Б. К. КЛОКОВ

Обмотчик электрических машин

Б. К. КЛОКОВ

ОБМОТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета СССР
по профессионально-техническому образованию
в качестве учебника для средних
профессионально-технических училищ

МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1982

К 50

Рецензенты: канд. техн. наук **М. В. Антонов**, инж. **В. А. Семенов**.

Со всеми замечаниями и предложениями просим обращаться по адресу: *Москва, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

Клоков Б. К.

К 50 Обмотчик электрических машин: Учебник для сред. проф.-техн. училищ. — М.: Высш. школа, 1982. — 280 с., ил. — (Профтехобразование. Электрические машины).

35 к.

В учебнике рассмотрена технология выполнения обмоточных и изолировочных работ при производстве электрических машин. Приводится описание конструкций различных типов машин. Много внимания уделено вопросам составления и чтения схем обмоток и конструкции их изоляции. Освещены вопросы механизации изолировочных и обмоточных работ; приведены описания и схемы работы современных намоточных и изолировочных станков, различных установок и приспособлений.

Учебник предназначен для учащихся средних профессионально-технических училищ по профессии «Обмотчик элементов электрических машин». Он может быть также использован для индивидуального и бригадного обучения рабочих этой и смежных профессий в учебной сети промышленных предприятий.

$К\frac{2302030000-152}{052(01)-82}36-82$

ББК 31.261
6П2.1.081

ВВЕДЕНИЕ

Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981–1985 годы и на период до 1990 года определяют необходимость широкой электрификации, которая является основой технического прогресса промышленности и сельского хозяйства. Только всестороннее развитие электрификации даст возможность полностью механизировать производство, внедрить автоматику и увеличить производительность труда. В осуществлении этой задачи важная роль принадлежит электромашиностроению.

Электрические машины очень разнообразны и широко распространены и в промышленности, и в сельском хозяйстве, и на транспорте. Конструкция электрических машин определяется типом, мощностью, назначением, условием их эксплуатации и многими другими факторами: есть двигатели, вращающиеся с частотой в несколько десятков и даже сотен тысяч оборотов в минуту, и двигатели, которые делают один-два оборота в сутки. Различные электрические машины работают и на космических станциях, и под водой.

В этой книге мы будем рассматривать электрические машины общего назначения, т. е. электрические двигатели и генераторы мощностью более нескольких сотен ватт, предназначенные для промышленных предприятий и электростанций, рассчитанные на работу от трехфазных сетей с частотой 50 Гц или от сетей постоянного тока.

Широкое распространение электрических машин объясняется простотой передачи электроэнергии на большие расстояния и удобством ее использования. От тепловых, гидравлических или атомных электростанций, на которых расположены генераторы, электроэнергия по линиям электропередачи передается на тысячи километров до места ее потребления - городов, заводов, шахт, железнодорожных магистралей. Основные потребители электроэнергии – электродвигатели – просты и надежды в работе, имеют более высокий коэффициент полезного действия, чем любые другие современные двигатели, могут быть легко уста-

новлены в нужном месте и работают, совершенно не загрязняя окружающую среду: без дыма, выделения газов и вредных выхлопов, как, например, двигатели внутреннего сгорания. Поэтому в планах развития народного хозяйства всегда предусматривается опережающий другие отрасли рост выработки электроэнергии и производства электрических двигателей. Увеличиваются также требования к качеству и надежности электрических машин.

Основной причиной преждевременного выхода из строя двигателей и генераторов являются различные неисправности их обмоток. Поэтому увеличение надежности электрических машин зависит от соблюдения правильной технологии обмоточных работ и от квалификации обмотчиков. На современных электромашиностроительных заводах механизированы многие операции, которые производились обмотчиками вручную. Сейчас их выполняют разнообразные механизмы: автоматические и полуавтоматические станки, различные установки и агрегаты. Несмотря на это, требования к квалификации обмотчика не только не уменьшились, но во многом повысились. Квалифицированный обмотчик на современном заводе должен уметь не только самостоятельно изготовить и уложить обмотку в машины различных типов, но и знать устройство и принцип работы многочисленных станков, механизмов и приспособлений, уметь их настраивать по заданной технической документации и использовать в своей работе. От квалификации и опыта обмотчиков в первую очередь зависит надежность выпускаемых заводом электрических машин.

Независимо от того, какую работу выполняет обмотчик на заводе в данное время, он должен знать технологию всех обмоточно-изолировочных работ в производстве электрических машин. Это позволит ему избежать многих ошибок в работе, а при необходимости быстро освоить выполнение других операций по изготовлению и укладке обмотки.

При изучении технологии обмоточно-изолировочных работ необходимо учитывать, что каждая операция, выполняемая обмотчиком на производстве, является частью общего технологического цикла изготовления электрических машин. Поэтому от качественного выполнения даже самой мелкой операции зависит надежность работы всей электрической машины.

ГЛАВА I
КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ

Электрические машины – это вращающиеся электромеханические преобразователи. Электрические генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую, двигатели – электрическую энергию в механическую. Существуют электрические машины, которые преобразуют электрическую энергию переменного тока в энергию постоянного тока или наоборот. Они так и называются преобразователями.

Электрические машины могут иметь самую разнообразную конструкцию и различную мощность. По мощности их условно подразделяют на несколько групп. К машинам малой мощности обычно относят электрические машины, мощность которых не превышает 8 – 10 кВт. Среди них выделяют группу машин мощностью менее 400 – 500 Вт. Их называют микромашинами. Машины мощностью приблизительно от 10 до нескольких сотен киловатт относят к машинам средней и свыше тысячи киловатт – к машинам большой мощности.

Одна и та же электрическая машина может работать и как двигатель, и как генератор. В первом случае ее обмотки питаются током от сети, а вал соединен с приводным механизмом, во втором вал вращается каким-либо двигателем (турбиной, двигателем внутреннего сгорания, ветряным и т. п.), а обмотка соединена с сетью, по которой выработанная генератором электроэнергия подается к потребителям. По своей конструкции электрические машины одного типа, предназначенные для работы как двигатели или как генераторы, лишь незначительно отличаются друг от друга.

По роду тока электрические машины подразделяются на машины переменного и постоянного тока. Машины переменного тока могут быть синхронными, асинхронными или коллекторными.

Несмотря на большое разнообразие электрических машин, у них есть много общих элементов, которые входят в конструкцию любой электрической машины. На рис. 1 показана конструктивная схема вращающейся электрической машины средней мощности.

Статор *1* представляет собой полый толстостенный цилиндр. В большинстве машин он неподвижен. Внутри статора проходит вал *6*, на который насажен вращающийся ротор *3*. Диаметр ротора всегда меньше, чем внутренний диаметр статора. Расстояние между поверхностями статора и ротора называют воздушным зазором. По обеим сторонам воздушного зазора на статоре и роторе располагаются обмотки *2* и *4*. Обмотки собраны в отдельные катушки, соединенные в определенной последовательности друг с другом. Ток одной из обмоток, например обмотки *4* ротора, возбуждает электромагнитное поле машины — создает магнитный поток. Эта обмотка называется обмоткой возбуждения, а ток в ней — током возбуждения. Она может быть расположена на роторе, как показано на рис. 1, или на статоре. Чтобы ток возбуждения не был слишком велик и магнитное поле было сосредоточено внутри машины, статор и ротор делают из стали. Магнитное сопротивление стали много меньше, чем воздуха, поэтому магнитные силовые линии потока, которые всегда замыкаются по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, практически не выходят за пределы машины.

Части статора и ротора, в которых замыкается магнитный поток, называют их магнитопроводами или сердечниками, а путь, по которому проходят магнитные силовые линии потока, — магнитной цепью машины.

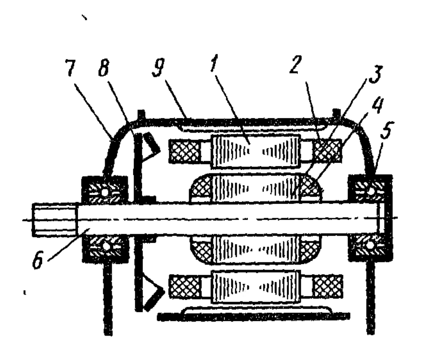


Рис. 1. Конструктивная схема вращающейся электрической машины

Катушки обмотки возбуждения располагают таким образом, чтобы силовые линии потока имели строго определенное направление: проходили по статору и ротору, пересекая воздушный зазор, и на своем пути пронизывали

витки другой обмотки (на рис. 1 — обмотки 2 статора).

Магнитный поток в статоре и роторе в зависимости от типа машины может быть постоянным или переменным. Переменный поток перемагничивает сталь сердечника и наводит в ней вихревые токи, при этом сердечник нагревается. На это расходуется часть энергии, потребляемой электрической машиной. Чтобы уменьшить расход энергии на нагрев стали, сердечники, в которых магнитный поток переменный, делают наборными из отдельных, изолированных друг от друга тонких листов электротехнической стали (шихтуют). Вихревые токи в шихтованных сердечниках и нагрев стали уменьшаются. Если поток постоянный, то перемагничивания не происходит и сердечники делают более простыми — массивными из конструкционной стали, а в некоторых машинах — литыми из стали или чугуна.

Шихтованные сердечники статоров машин переменного тока запрессовывают в корпус — станину. Станины 9 в машинах средней и большой мощности делают стальными или чугунными, в машинах малой мощности — алюминиевыми. С обеих сторон станины к ее торцам укрепляют торцевые щиты 7, в которые входят наружные обоймы подшипников 5. Поэтому торцевые щиты часто называют также подшипниковыми. В машинах большой мощности масса ротора возрастает, поэтому подшипники устанавливают не в щитах, а рядом с машиной на подшипниковых стойках. Такие подшипники называют стояковыми.

Вентилятор 8 служит для создания потока воздуха, охлаждающего сердечники и обмотки машины.

Обмотки электрических машин делают из материала с малым удельным электрическим сопротивлением, в большинстве случаев из медных изолированных проводов. Иногда применяют алюминиевые провода, однако изготовление обмотки из алюминиевых обмоточных проводов значительно сложнее, чем из медных, так как они менее прочные и их трудно спаивать между собой, поэтому в электрических машинах они не нашли широкого применения.

§ 2. ТИПЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Каждый из типов электрических машин (синхронные, асинхронные, постоянного тока) имеют специфические особенности конструкции, различные рабочие характеристики

и способы регулирования. Поэтому области применения машин различных типов четко разграничены.

Синхронные машины. Синхронные машины могут работать только с постоянной частотой вращения, зависящей от числа их полюсов и частоты питающей сети. Они применяются в основном как генераторы на электростанциях или как двигатели механизмов, которые не требуют частых пусков и работают с постоянной скоростью.

Обмотка возбуждения синхронных машин располагается на роторе и питается постоянным током. В машинах с частотой вращения не более 1500 об/мин (рис. 2) катушки обмотки возбуждения *3* состоят из большого числа витков. Они насажены на стальные сердечники, закрепленные на роторе. Катушка с сердечником образует полюс *7* ротора, и машины такой конструкции называют явнополюсными. Ток в обмотку возбуждения подается от возбудителя — генератора постоянного тока *12* или от выпрямителя через неподвижные щетки *11* и контактные кольца *10*, закрепленные на валу *8* ротора. Сердечник статора *6* собирается (шихтуется) из отдельных листов электротехнической стали. В пазах сердечника, равномерно распределенных по его внутренней поверхности, располагаются катушки обмотки статора *4*. Выводные концы обмотки выведены на зажимы коробки выводов *9*. Сердечник статора запрессован в станину *5*. К торцам станины крепятся торцевые (подшипниковые) щиты *2*, в которых установлены подшипники *1*.

Мощность синхронных явнополюсных двигателей не превышает нескольких сотен или тысяч кВт. Мощность

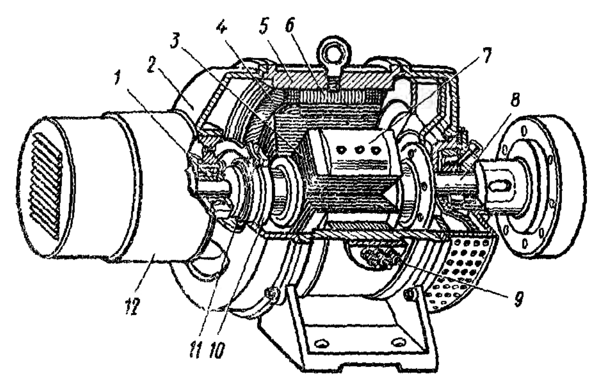


Рис. 2. Синхронная машина средней мощности

явнополюсных генераторов, установленных на гидроэлектростанциях (гидрогенераторов), значительно больше: на Красноярской ГЭС установлены гидрогенераторы мощностью 500 тыс. кВт, а на Саяно-Шушенской – 640 тыс. кВт

Конструкция роторов синхронных машин с частотой вращения 3000 об/мин отличается от рассмотренной выше. При 3000 об/мин центробежные силы, действующие на ротор, очень велики, поэтому приходится выполнять ротор цельным из поковок стали высокой прочности. Обмотка возбуждения размещается в пазах, которые фрезеруют в роторе. Такую конструкцию имеют все генераторы, установленные на тепловых и атомных электростанциях. Они называются турбогенераторами. Турбогенераторы – самые мощные электрические машины. На заводе «Электросила» им. С. М. Кирова в 1978 г. построены турбогенераторы мощностью 800 000 и 1 200 000 кВт. Сейчас готовится к выпуску еще более мощный турбогенератор на 1600 МВт.

Асинхронные машины. Асинхронные машины в большинстве случаев применяются как двигатели. Они приводят в движение почти все виды станков в промышленности, работают в шахтах, на буровых установках, широко применяются в бытовой технике.

В асинхронных машинах в отличие от синхронных специальная обмотка возбуждения отсутствует. Магнитный поток создается током намагничивания, который протекает по той же обмотке, что и ток нагрузки, т. е. по обмотке статора. Обмотка ротора не соединена с внешней сетью. Ток в ней возникает от эдс, наводимых при пересечении витками обмотки магнитных силовых линий потока.

Асинхронные двигатели выпускают двух типов: с короткозамкнутыми (рис. 3) и фазными (рис. 4) роторами. Обмотка фазных роторов изолированная и имеет столько же фаз и полюсов, как и обмотка статора. Начала фаз обмотки подведены к контактным кольцам. С помощью щеток, прилегающих к кольцам, обмотку ротора соединяют с пусковым реостатом. Во время пуска и разгона двигателя сопротивления реостата включаются последовательно с каждой из фаз обмотки и ограничивают токи в них. При номинальном режиме работы, чтобы уменьшить сопротивление роторной цепи, реостат выводят и обмотку ротора замыкают накоротко. Двигатели с фазными роторами могут пускаться плавно без больших бросков тока в сети

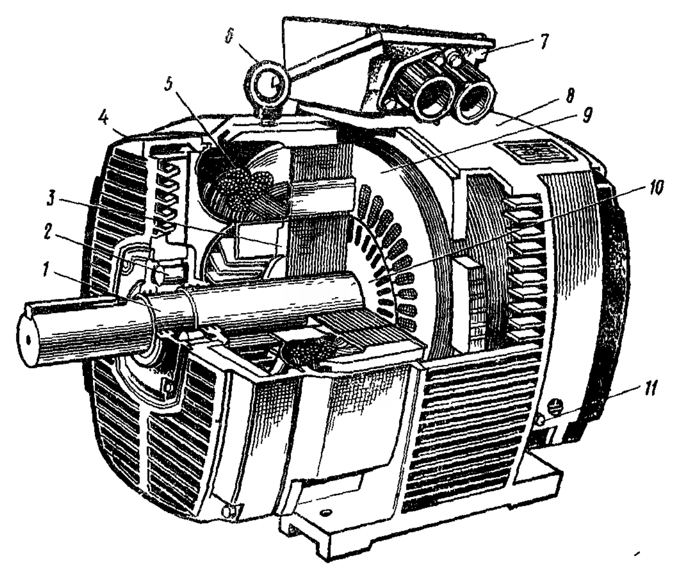


Рис 3 Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором средней мощности

1 – вал, 2 – роликовый подшипник 3 – обмотка ротора, 4 подшипниковый щит, 5 – обмотка статора 6 рым болт, 7 коробка выводов, 8 корпус статора 9 – сердечник статора 10 сердечник ротора 11 – болт заземления

Короткозамкнутые роторы имеют неизолированную постоянно замкнутую накоротко обмотку Двигатели с короткозамкнутыми роторами проще по конструкции, дешевле и надежней в работе, чем с фазными, так как в них отсутствует изоляция обмотки ротора, нет скользящих контактов – щетки-кольца и для пуска не требуется пускового реостата Их недостатком является резкое увеличение тока во время пуска пусковой ток может в шесть-семь раз превышать номинальный Несмотря на это, асинхронные короткозамкнутые двигатели из-за простоты конструкции и удобства эксплуатации – самые распространенные электрические двигатели

Машины постоянного тока (рис 5) Недостатком синхронных и асинхронных двигателей является отсутствие простых способов регулирования частоты их вращения Поэтому в приводах механизмов, в которых требуется регулировать скорость в процессе работы – в некоторых станках, в подъемных устройствах, на железнодорожных электровозах и другом транспорте на электротяге, – применяют двигатели

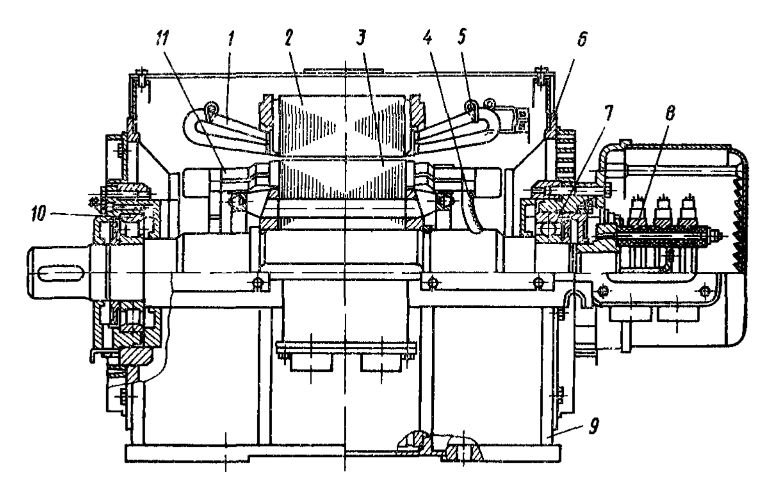


Рис 4 Конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором мощностью 250 кВт

1 – обмотка статора, *2* – сердечник статора, *3* сердечник ротора, *4* – токоподвод ротора, *5* – бандажное кольцо *6* – торцевой щит, *7* – шариковый подшипник *8* – контактные кольца *9* станина, *10* – роликовый подшипник *11* – обмотка ротора

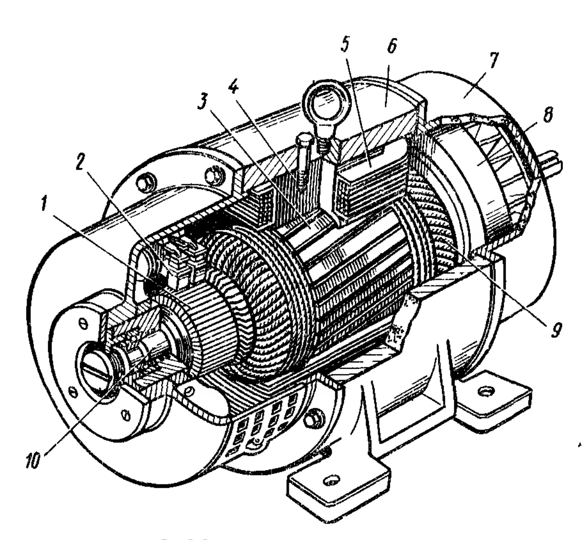


Рис 5 Машина постоянного тока

1 – коллектор *2* щетки, *3* – якорь, *4* – главный полюс, *5* – катушка обмотки возбуждения, *6* станина, *7* – подшипниковый щит, *8* – вентилятор, 9 – обмотка якоря, *10* – вал

постоянного тока. Их частота вращения может быть плавно изменена в процессе работы в широких пределах. Машины постоянного тока применяют и как генераторы постоянного тока. В этих машинах катушки обмотки возбуждения располагаются на полюсах, которые крепятся на статоре. Ток возбуждения постоянный, поэтому магнитный поток в статоре тоже постоянный. Это позволяет статоры машин постоянного тока делать не шихтованными, как в синхронных и асинхронных машинах, а более дешевыми – массивными из стали или чугуна. Такой статор имеет бóльшую механическую прочность и одновременно выполняет роль станины. На его наружной поверхности имеются лапы для закрепления машины на фундаменте, к торцам крепятся подшипниковые щиты. Поэтому статор машины постоянного тока обычно называют станиной.

Ротор машины постоянного тока называют якорем. В обмотке якоря протекает переменный ток, и магнитный поток в его сердечнике переменный. Поэтому сердечник якоря делают шихтованным из листов электротехнической стали. Обмотка якоря соединена с коллектором, расположенным на одном валу с якорем. Коллектор представляет собой цилиндр, собранный из отдельных изолированных друг от друга медных пластин, каждая из которых соединяется с витками обмотки. К пластинам коллектора плотно прилегают неподвижные щетки, соединенные с внешней сетью. При работе машины вращающийся коллектор служит преобразователем тока. Через коллектор и скользящие по нему щетки обмотка якоря, в которой протекает переменный ток, соединяется с внешней сетью постоянного тока. Щетки при вращении коллектора через его пластины поочередно соединяются с разными витками обмотки. При этом беспрерывно происходит замыкание и разрыв контактов пластины коллектора-щетки. Этот процесс называют коммутацией. Он всегда сопровождается искрением под щетками. При хорошей коммутации искрение под щетками почти незаметно, при плохой большие искры могут повредить пластины коллектора и машина выйдет из строя. Чтобы улучшить коммутацию, на станине помимо полюсов с обмоткой возбуждения устанавливают добавочные полюсы. Их называют также дополнительными, а полюсы с обмоткой возбуждения – главными. Магнитные потоки добавочных полюсов несколько изменяют магнитное поле машины и коммутация улучшается.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные части электрической машины и укажите их назначение.
2. Какие части электрических машин делают шихтованными из листов электротехнической стали?
3. Для привода каких механизмов используют синхронные двигатели?
4. Какие машины называют турбогенераторами?
5. Для привода каких механизмов устанавливают двигатели постоянного тока?
6. В чем заключается преимущество асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором?
7. В каких обмотках синхронных машин ток постоянный и в каких переменный?
8. Где располагается обмотка возбуждения в машинах постоянного тока?
9. Какую роль играет коллектор в машинах постоянного тока?

ГЛАВА II
ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 3. ТРЕБОВАНИЕ К ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Изоляция любой детали электрической машины должна сохранять высокую надежность в течение всего периода эксплуатации машины, поэтому к ней предъявляют разносторонние требования, главным из которых является высокая *электрическая прочность.*

Если поместить лист электроизоляционного материала между двумя электродами и постепенно повышать напряжение между ними, то при каком-то значении напряжения произойдет пробой: электрический разряд пройдет сквозь слой изоляции и электроды замкнутся. Это напряжение называется пробивным. Чем выше пробивное напряжение, тем больше электрическая прочность изоляции. Современные электроизоляционные материалы имеют высокие пробивные напряжения, достигающие десятков и даже сотен кВ на 1 мм толщины. Однако такие высокие пробивные напряжения изоляционные материалы имеют только в первоначальном своем состоянии, непосредственно после изготовления. В процессе изготовления и во время эксплуатации машины электрическая прочность ее изоляции понижается.

В процессе работы машины на изоляцию действует вибрация сердечников, она испытывает большие механические напряжения при резких изменениях тока, на изоляцию вращающихся деталей машины действуют, кроме того, центробежные силы. Поэтому необходимо, чтобы изоляция обладала не только электрической, но и достаточной *механической прочностью*.

С течением времени свойства изоляции ухудшаются. Она высыхает, становится хрупкой, ломкой и теряет механическую и электрическую прочность. Этот процесс называют старением. Процесс старения изоляции ускоряется при ее нагревании. При небольшом нагреве свойства изоляции ухудшаются медленно, но если температура превысит определенный уровень, то этот процесс резко ускоряется. Уровень длительно допустимой температуры определяет *нагревостойкость* изоляции.

ГОСТ 8865 – 70 разделяет все электроизоляционные материалы по нагревостойкости на семь классов. Классы обозначаются латинскими буквами Y, A, E, B, F, H и C. Допускаемая нагревостойкость материалов для классов: Y – 90, A – 105, E – 120, B – 130, F – 150, H – 180, C – более 180 °C.

Нагрев частей электрической машины зависит не только от величины потерь в них, но и от температуры окружающего воздуха. Температура одной и той же машины, работающей в холодном помещении, будет меньше, чем в теплом. Поэтому тепловое состояние машины оценивают по превышению температуры ее частей над температурой окружающего воздуха, которая принимается равной 40 °C. ГОСТ 183 – 74 устанавливает предельно допустимые превышения температуры обмоток в зависимости от типа машины и класса нагревостойкости их изоляции.

На электрическую прочность изоляции в большой степени влияет содержание в ней влаги, в то же время электрические машины не всегда работают в помещениях с сухим и чистым воздухом. Если материал изоляции будет пористым, то влага из воздуха проникнет в ее поры и резко уменьшит электрическую прочность. Свойство материала впитывать влагу из воздуха называют гигроскопичностью. Чтобы электрическая прочность изоляции не снижалась во влажных помещениях, она должна быть мало гигроскопична. Такую изоляцию называют *влагостойкой*.

Некоторые машины предназначаются для работы в

помещениях, воздух которых содержит пары масел или примеси газов. Изоляция этих машин должна быть *маслостойка* и *химостойка*.

Способность изоляции пропускать тепло от проводников к окружающему воздуху называется ее *теплопроводностью*. Проводники, окруженные слоем изоляции из материала, плохо проводящего тепло, будут нагреваться сильнее, чем при ее хорошей теплопроводности, их температура возрастет и процесс старения изоляции ускорится. Чтобы избежать этого, для изоляции электрических машин применяют материалы с высокой теплопроводностью, а изоляцию выполняют монолитной, по возможности без включений воздуха, чтобы ее теплопроводность не уменьшалась.

В процессе изолирования различных деталей электрической машины изоляционный материал приходится неоднократно изгибать, формовать, придавая ему нужную конфигурацию, опрессовывать, добиваясь монолитности слоев изоляции, и т. п. Во время укладки обмотки в пазы ее изоляция подвергается изгибам, растяжению, иногда ударам и другим механическим воздействиям. Поэтому к изоляционным материалам, применяемым в электрических машинах, предъявляют также ряд требований, определяемых технологией изготовления изоляции: материал должен легко формоваться и сохранять после формовки приданную ему форму, не расслаиваться во время обработки и установки изоляции, не повреждаться при перегибах и растяжениях, сжатии при опрессовке и при укладке в пазы.

Таким образом, чтобы при изготовлении обмоток, укладке их в пазы и во время работы машины изоляция сохранила достаточную электрическую прочность, она должна быть монолитна, иметь высокую механическую прочность, нагревостойкость, теплопроводность, влагостойкость, а в необходимых случаях также маслостойкость, химостойкость и другие качества.

§ 4. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В настоящее время не существует какого-либо одного материала, который имел бы все свойства, которыми должна обладать изоляция электрической машины. Обычно изоляционные материалы с высокой электрической прочностью имеют плохую механическую прочность и, наоборот, у материалов с высокой механической прочностью сравнительно малая электрическая прочность. Поэтому при

конструировании современной изоляции в большинстве случаев применяют не один, а несколько различных материалов, свойства которых взаимно дополняют друг друга, причем материал с высокой электрической прочностью образует основной электроизолирующий слой. Материал с высокой механической прочностью предохраняет этот слой от возможных механических повреждений.

Изоляционные материалы можно подразделить на несколько групп: материалы, основой которых служит целлюлоза и хлопчатобумажные волокна; стекловолокнистые, т. е. изготовленные из стеклянного волокна; изготовленные на основе слюды и синтетические. В некоторых конструкциях для изоляции применяют также материалы, полученные из асбеста: пряжу, ткани, бумаги и картоны.

Из целлюлозы делают различные бумаги и электрокартон, а из хлопчатобумажной пряжи – полотна и ленты. Электрическая прочность этих материалов невелика, но они дешевы, легко формуются, изгибаются и имеют сравнительно большую механическую прочность. Их применяют как вспомогательные для защиты других, менее прочных изоляционных материалов и в качестве различных прокладок. По нагревостойкости они относятся к классу Y. Пропитка лаком повышает их нагревостойкость до класса А. Пропитанные лаком хлопчатобумажные ткани носят название лакотканей. Ранее их широко применяли в обмотках класса изоляции А. В изоляции современных машин вместо хлопчатобумажных лент и тканей почти всегда применяют стеклоленты и стеклоткани – материалы, сотканные из тонких стеклянных нитей. Они обладают высокой нагревостойкостью и большой прочностью на разрыв, но нестойки к истиранию и повреждаются при резких ударах и многократных перегибах. Пропитка лаком повышает их механические свойства, но снижает нагревостойкость. После пропитки их нагревостойкость определяется нагревостойкостью пропиточного состава. Эти материалы входят как вспомогательные в изоляцию классов нагревостойкости В, F и Н.

Широко распространены в конструкции современных машин изоляционные материалы, основой которых является слюда. Слюда – минерал. Она встречается в природе в виде кристаллов, которые легко расщепляются на пластины. Тонкие пластины – лепестки слюды – толщиной 0,005 – 0,045 мм называют щипаной слюдой. Склеивая лепестки слюды, получают различные электроизоляционные

материалы — миканиты. Для увеличения их механической прочности лепестки слюды в ряде случаев наклеивают на подложку из бумаги или ткани. Подложка, кроме того, предохраняет лепестки слюды от отставания при изгибе материала. Она может быть с одной или с двух сторон пластинок слюды. В зависимости от способа изготовления, сорта слюды, наличия или отсутствия подложки различают несколько сортов миканитов.

Твердые миканиты изготовляют без подложек, горячим прессованием пластинок слюды и термореактивных связующих. Они применяются для получения плоских не подвергающихся изгибам изоляционных прокладок и имеют большую механическую прочность. К твердым миканитам относятся коллекторный, из которого изготовляют прокладки для изоляции коллекторных пластин друг от друга, и прокладочный, применяемый для изготовления различных прокладок в пазах или изоляционных шайб.

Формовочные миканиты в отличие от твердых после изготовления сохраняют способность принимать ту или иную форму при прессовании в нагретом состоянии и сохранять ее после охлаждения. Они применяются в основном для изоляции коллекторов (фигурные коллекторные манжеты), различных втулок, каркасов катушек и других фасонных изоляционных деталей. К особой разновидности формовочного миканита относят микафолий — тонкий листовой материал, состоящий из пластинок слюды, наклеенных на подложку из бумаги или стеклоткани (стекломикафолий). Он используется для изготовления твердой гильзовой изоляции обмоток. Микафолий с бумажной подложкой относится к классу нагревостойкости В. Стекломикафолий в зависимости от связующего состава может быть использован в изоляции классов В, F или Н.

Гибкие миканиты отличаются от твердых и формовочных гибкостью при нормальной температуре, которую они сохраняют и после нагрева и охлаждения. Они применяются для изоляции различных частей обмоток в пазовой и лобовой частях, прокладок и т. п. Разновидностью гибкого миканита является микалента — ленточный материал из склеенных пластинок слюды с двусторонней подложкой из микалентной бумаги или стеклоленты (стекломикалента). Толщина микалент 0,13 или 0,17 мм. Их применяют главным образом для изоляции обмоток высоковольтных машин. В зависимости от клеящего состава и материала подложек микаленты относятся к классам

нагревостойкости B, F или H. Микалента поступает в изолировочные цехи свернутой в ролики, упакованной в плотно закрытые жестяные коробки. Вынутая из коробки микалента должна быть немедленно использована, так как на воздухе она быстро пересыхает и становится непригодной для изолирования.

Применяют также более сложные по своей конструкции материалы, например лакостекломиканит – материал, состоящий из двух слоев пластинок слюды, одного слоя стеклолакоткани и одного слоя стеклоткани. Этот материал имеет хорошие механические свойства и высокое пробивное напряжение.

Изготовление материалов на основе щипаной слюды чрезвычайно трудоемко и не может быть в достаточной степени механизировано, так как требует предварительной «щипки» слюды на пластины, их калибровки и равномерной наклейки по слоям.

В настоящее время широко применяют изоляционные материалы, в которых используются не пластины слюды, а ее мелкие чешуйки, полученные механическим раздроблением. Из них изготовляют слюдинитовую бумагу, которая служит основой для ряда изоляционных материалов, аналогичных миканитам. С помощью связующих материалов и стеклянных подложек получают коллекторный и формовочный *слюдиниты*, гибкие слюдиниты и стеклослюдиниты, слюдинитофолий и стеклослюдинитофолий, слюдинитовые и стеклослюдинитовые ленты и другие материалы. Эти материалы вполне заменяют миканиты и в то же время они много дешевле и технологичнее, чем изоляционные материалы на основе щипаной слюды.

Из более крупных чешуек слюды изготовляют *слюдопластовые* материалы, аналогичные слюдинитовым, но имеющие более высокие механические свойства (коллекторный, формовочный и прокладочный слюдопласт, слюдопластофолий, слюдопластовые ленты и т. п.). Эти материалы не уступают по своим электрическим свойствам соответствующим сортам миканитов, но превосходят их в гибкости, поэтому широко используются в современных изоляционных конструкциях.

В последние годы для изоляции электрических машин все более широко используют синтетические материалы. Наибольшее распространение получили различные полиэтилентерефталатные пленки типа лавсан, хостафан, полиамидные пленки и различные бумаги. Они имеют высокую

электрическую и механическую прочность, теплопроводность и влагостойкость. Пленки выпускают толщиной 0,05 – 0,1 мм и применяют в основном в сочетании с защитным слоем электрокартона или стеклолакоткани. По нагревостойкости такая изоляция относится к классу Е или В.

Изоляционные материалы на основе асбеста обладают высокой нагревостойкостью и механической прочностью, но в электрических машинах находят ограниченное применение из-за их низкой теплопроводности и высокой гигроскопичности.

§ 5. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Обмотки электрических машин выполняют из круглых или прямоугольных обмоточных проводов. Их обозначение состоит из четырех букв, первая из которых – буква П – определяет название – провод, а следующие буквы характеризуют проводниковую изоляцию. Большинство обмоток низковольтных машин выполняют из проводов с эмалевой изоляцией (ПЭВ-2, ПЭТВ, ПЭТ и др.) Основное их преимущество перед другими проводами заключается в малой толщине изоляции (около 0,05 мм на одну сторону). Для обмоток высоковольтных машин наиболее часто применяют провода ПСД и ПСДК с изоляцией из стеклянного волокна, пропитанного лаками

Изоляция проводников, как и другие виды изоляции, подразделяется на классы по нагревостойкости Так, изоляция провода ПЭВ-2 относится к классу нагревостойкости А или Е, ПЭТВ - к классу В, а обмоточные провода ПЭТ-155 используют в обмотках с изоляцией класса F, провода ПСД – с изоляцией классов нагревостойкости В и F, а ПСДК – классов F или Н

На большинстве современных электромашиностроительных заводов намотка обмотки из круглых проводов механизирована. При механической укладке проводов в пазы их изоляция подвергается значительно большим механическим воздействиям, чем при укладке обмотки вручную. Поэтому промышленность выпускает специальные обмоточные провода с повышенной прочностью эмалевого изоляционного слоя. В конце буквенного обозначения таких проводов ставят букву М, например провода ПЭВМ, ПЭТМ

Обмотки электрических машин наиболее часто изготовляют из медных обмоточных проводов, однако в ряде случаев используют и алюминиевые В обозначении алю-

миниевых проводов помимо таких же букв, что и в обозначении медных, входит буква А, например провод ПЭВА-2 алюминиевый обмоточный провод с такой же изоляцией, что и медный обмоточный провод ПЭВ-2.

Размеры обмоточных проводов, выпускаемых промышленностью, регламентированы ГОСТом. Существуют таблицы, в которых указаны диаметры круглых проводов или размеры прямоугольных и виды изоляции, с которой эти провода выпускаются. Обычно в этих же таблицах даны площадь поперечного сечения провода и максимальные размеры изолированного обмоточного провода. Иногда толщина изоляции обмоточного провода указывается в зависимости от вида изоляции и размеров провода.

Таблица 1. **Диаметры и площади поперечных сечений круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155**

Диаметр неизолированного провода, мм	Средний диаметр изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр неизолированного провода, мм	Средний диаметр изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²
0,20	0,23	0,0314	0,75	0,815	0,442
(0,212)	0,242	0,0353	0,80	0,865	0,503
0,224	0,259	0,0394	0,85	0,915	0,567
(0,236)	0,271	0,0437	0,90	0,965	0,636
0,25	0,285	0,0491	0,95	1,015	0,709
(0,265)	0,30	0,0552	1,00	1,08	0,785
0,28	0,315	0,0616	1,06	1,14	0,883
(0,30)	0,335	0,0707	1,12	1,20	0,985
0,315	0,350	0,0779	1,18	1,26	1,094
0,335	0,370	0,0881	1,25	1,33	1,227
0,355	0,395	0,099	1,32	1,405	1,368
0,375	0,415	0,1104	1,40	1,485	1,539
0,40	0,44	0,1257	1,50	1,585	1,767
0,425	0,465	0,1419	1,60	1,685	2,011
0,45	0,49	0,159	1,70	1,785	2,27
(0,475)	0,515	0,1772	1,80	1,895	2,54
0,50	0,545	0,1963	1,90	1,995	2,83
(0,53)	0,585	0,221	2,00	2,095	3,14
0,56	0,615	0,246	2,12	2,22	3,53
0,60	0,655	0,283	2,24	2,34	3,94
0,63	0,69	0,312	2,36	2,46	4,36
(0,67)	0,73	0,353	2,50	2,60	4,91
0,71	0,77	0,396			

Примечание. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

В табл. 1 приведены диаметры и площади поперечного сечения круглых обмоточных проводов с эмалевой изоляцией, наиболее часто применяемых в низковольтных машинах общего назначения.

Отдельные типы обмоток из проводников большого сечения изготовляют из неизолированных прямоугольных проводов или из шинной меди. Их изолируют перед установкой в пазы машины. Обычно такие обмотки выполняют в фазных роторах асинхронных двигателей или в машинах постоянного тока.

§ 6. МЕТОДЫ ИЗОЛИРОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЧАСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Изолирование токопроводящих частей электрической машины выполняется несколькими способами: непрерывной ленточной изоляцией по всей длине токопроводящей части, обертыванием изолируемой детали или ее части листовым изоляционным материалом, установкой различных прокладок или изоляционных шайб, расположением токопроводящих частей на некотором удалении от корпуса, сердечника и других стальных деталей машины, соединенных с корпусом. Способ изолирования выбирают в зависимости от конструкции и назначения токопроводящей части, ее расположения в машине, от уровня напряжения и требований к изоляции.

Непрерывная изоляция. Непрерывная изоляция выполняется из ленточных материалов: микаленты, стекломикаленты, различных слюдинитовых лент, стеклоленты, хлопчатобумажных лент и др. Ее можно наматывать на отдельный проводник для усиления его изоляции, на несколько проводников одновременно или на всю катушку обмотки. Различают несколько способов намотки ленточной изоляции: вразбежку, впритык и с нахлестом одного витка на другой (рис. 6). Вразбежку (рис. 6, *а*) ленту наматывают для скрепления проводников катушки друг с другом в процессе изготовления обмотки. Лента, наложенная впритык (рис. 6, *б*), защищает наружную поверхность изолированной катушки от возможных механических повреждений. Для создания сплошного слоя электрической изоляции витки ленты располагают с нахлестом. Витки ленты можно наматывать так, чтобы половина ее ширины *b* ложилась на предыдущий виток, а половина – на изолируемую поверхность. Такое расположение называется наложением ленты вполнахлеста (рис. 6, *в*).

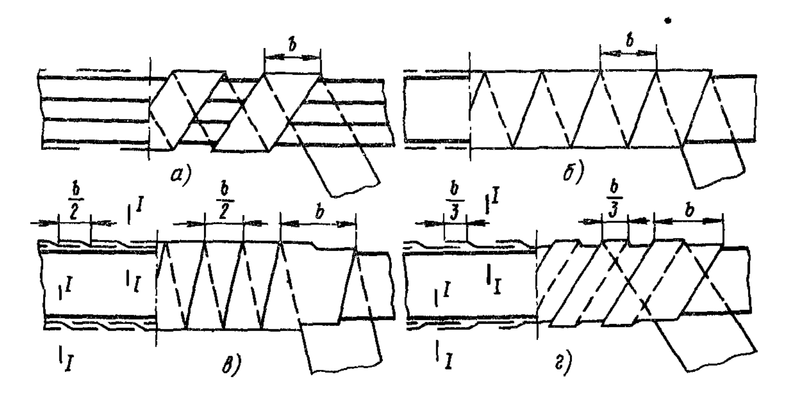


Рис. 6. Способы наложения изоляции:
а – вразбежку, *б* – впритык, *в* – вполнахлеста, *г* – втретьнахлеста

В результате получается ровный слой изоляции толщиной, равной двойной толщине ленты. Витки ленты могут перекрывать друг друга только на $^1/_3$ ширины, и толщина изоляции одного слоя получается неравномерной. Такой способ наложения изоляции называют втретьнахлеста (рис. 6, *г*). Изолирование с нахлестом витков создает сплошной слой изоляции, причем независимо от величины нахлеста (вполнахлеста или втретьнахлеста) электрическая прочность определяется толщиной только одного слоя изоляции, так как всегда остаются участки, на которых между изолированной деталью и наружной поверхностью расположен только один слой изоляции. На рис. 6, *в*, *г* эти участки отмечены цифрами *I* – *I*. При изоляции втретьнахлеста их ширина больше, в то же время общая толщина нанесенной изоляции одинакова при обоих способах наложения ленты. Поэтому для большей надежности почти во всех случаях непрерывную изоляцию накладывают вполнахлеста несмотря на то, что при этом расходуется несколько больше изоляционного материала.

Наложение непрерывной изоляции вручную – трудоемкая операция. В обмоточном производстве для ее механизации созданы устройства, позволяющие наносить непрерывную изоляцию с заданным нахлестом витков на провода, катушки и стержни обмотки. Эти устройства используются в различных изолировочных станках и установках для наложения корпусной или витковой изоляции.

Для наложения непрерывной изоляции на обмоточные провода применяют механический обмотчик (рис. 7). Обмоточный провод *1*, на который нужно нанести слой непрерывной изоляции, пропускают в отверстие диска *2*. На штырях диска устанавливаются на барабанах с небольшим наклоном один или два рулона с изоляционной лентой *3*. При вращении диска лента из рулона обертывается вокруг провода. Скорость движения провода и частота вращения диска согласованы так, что за время одного оборота диска провод продвигается на половину ширины ленты. Таким образом на него накладывается непрерывная изоляция вполнахлеста при одном рулоне с лентой в один слой и при двух рулонах – сразу в два слоя. Для создания нужного натяжения ленты барабаны с рулонами притормаживают.

Механический обмотчик можно использовать только для изолирования проводов, так как их можно продеть сквозь центральное отверстие диска. Для изоляции замкнутых катушек применяют обмоточные головки (рис. 8), основной частью которых является кольцо *1* с вырезом. В вырез пропускают сторону изолируемой катушки *2*. Кольцо вращается приводным ремнем *6* от шкива *5* двигателя. Ролики *3* и *8* служат для натяжения ремня и прижимают его к внешней поверхности вращающегося кольца. На кольце устанавливается один ролик *7* (или два) с ленточным изоляционным материалом (микалентой, стекломикалентой и т. п.). Конец ленты закрепляется на стороне изолируемой катушки *2*. При вращении кольца лента обматывает сторону

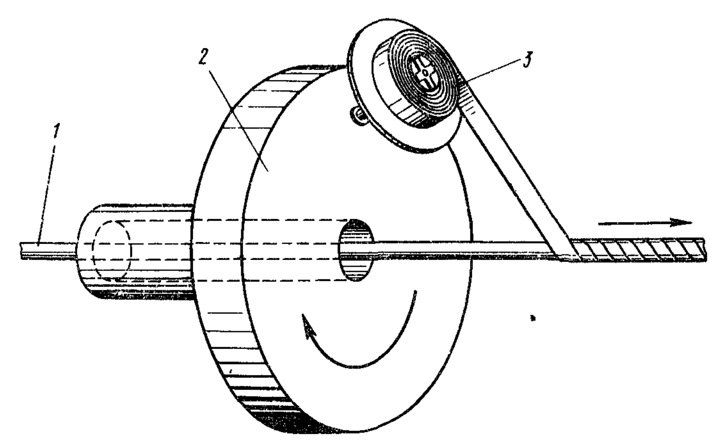


Рис 7 Механический обмотчик

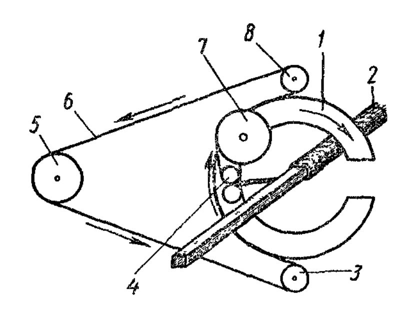


Рис. 8. Простая обмоточная головка

катушки. Направляющие ролики *4* служат для выравнивания ленты и создания ее натяга при изолировании. Частота вращения кольца, скорость движения (подача) изолируемой катушки и ширина ленты согласуются таким образом, чтобы лента ложилась с определенным перекрытием слоев, так же как и в механическом обмотчике. Обмоточные головки используются в изолировочных станках с автоматической или ручной подачей изолируемой детали. Обмоточные головки такой конструкции могут служить лишь для изолирования катушек с большим расстоянием между сторонами, так как во время работы рулоны с лентой обегают вокруг изолируемой детали.

Для наложения изоляции на полюсные катушки с малыми внутренними размерами пользуются обмоточными головками другого типа, работающими по принципу челнока (рис. 9). Шестерня-челнок *1*, вращающаяся от приводного двигателя в корпусе головки *3*, имеет вырез для прохода стороны изолируемой катушки *4*. Такой же вырез имеется

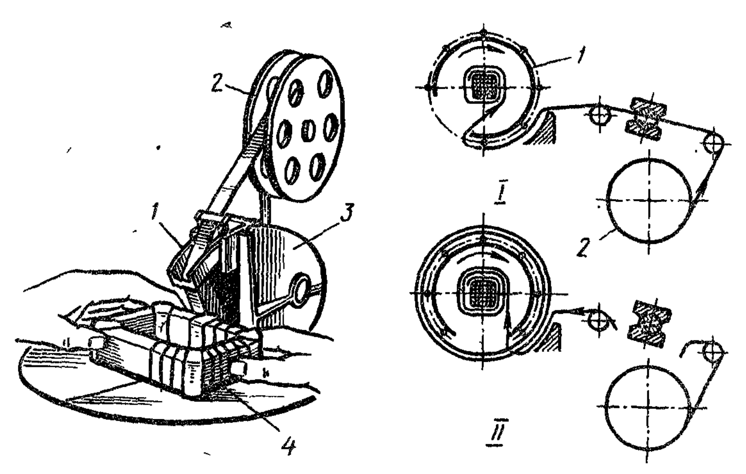


Рис. 9. Челночная обмоточная головка

в корпусе. Сторона катушки с намотанными на нее и закрепленными несколькими витками ленточной изоляции устанавливается в центр изолировочной головки (положение I). Рулон с лентой *2* размещается рядом с головкой. При вращении шестерни-челнока лента сматывается с рулона и изолирует катушку. Одновременно такое же количество ленты наматывается на внешнюю поверхность шестерни-челнока в предусмотренный для этого желоб. Когда изолирована половина катушки, ленту отрезают (положение *II*) и при дальнейшем вращении шестерни-рулона для изолирования используется ранее намотанная на нее лента.

Обертывание изолируемой детали листовым изоляционным материалом. Листовой изоляционный материал применяют для изоляции пазовых частей катушек. Прямолинейная пазовая часть катушек плотно обертывается несколько раз, и вокруг проводников образуется так называемая гильзовая изоляция или гильза. Для придания большей монолитности слоям изоляции гильзу после намотки всех слоев обкатывают в обкаточных станках и опрессовывают.

Различают мягкую и твердую гильзовую изоляцию. Для мягкой гильзовой изоляции применяют материал, длительное время сохраняющий гибкость, например гибкий миканит. После изготовления такая изоляция может быть несколько деформирована во время укладки и закрепления катушек в пазах. Большую электрическую прочность имеют твердые гильзы. Они выполняются из микафолия или стекломикафолия. После намотки и обкатки гильз из этих материалов они опрессовываются в горячих прессах и запекаются. При этом изоляционный лак микафолия полимеризуется и гильза приобретает большую монолитность и прочность.

Пазовая часть катушек машин низкого напряжения также изолируется листовым материалом, но во всыпных обмотках изоляция не может быть наложена на катушки до укладки обмотки из-за узкого шлица паза. Поэтому ее устанавливают не на катушки, а в пазы до укладки обмотки в виде пазовых коробов, создавая сплошной слой изоляции вокруг проводников, находящихся в пазах.

Установка прокладок. Способ изолирования с помощью различных прокладок или шайб из изоляционного материала очень широко распространен в электрических машинах. Нарезанные полосками прокладки устанавливают для усиления изоляции между витками катушек, для изоляции между слоями обмоток, для механической защиты основной изоляции от повреждений и т. п. Прокладки устанавливают

также для изоляции обмоткодержателей и под проволочными бандажами в якорях машин постоянного тока и роторах фазных асинхронных двигателей. Из коллекторного миканита выполняют изоляционные прокладки между пластинами коллекторов, из формовочного миканита и стекломиканита – коллекторные манжеты и изоляцию сердечников полюсов крупных синхронных машин и т. п.

§ 7. ВИДЫ И КОНСТРУКЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

Конструкция изоляции обмоток определяется их номинальным напряжением и конструкцией, а также конфигурацией пазов. По своему назначению изоляция подразделяется на корпусную, междуфазовую, витковую и проводниковую. Корпусная изоляция изолирует все витки катушки от корпуса и от других металлических частей машины. Витковая изоляция изолирует витки одной катушки друг от друга, проводниковая – каждый проводник от другого, междуфазовая – каждую фазу обмотки от других фаз.

Пазы электрических машин могут быть различной конфигурации. В статорах электрических машин переменного тока мощностью до 100 кВт на напряжение до 660 В делают полузакрытые пазы (рис. 10), в которые укладывают обмотку из круглого провода *1*. На разрезах пазов условно (без соблюдения масштаба) показано расположение изоляции. Такие пазы называют полузакрытыми Корпусная изоляция обмотки устанавливается в пазы до укладки обмотки. Она выполняется в виде коробов *2* из одного слоя (рис. 10, *а*) в машинах малой мощности или из нескольких (рис. 10, *б*) слоев изоляционного материала. Для уменьшения общей толщины изоляции эти слои склеивают, что, кроме того, уменьшает воздушные включения между ними и увеличивает теплопроводность изоляции.

Витковая изоляция в обмотках из круглого провода не устанавливается. Ее роль в таких обмотках выполняет изоляция отдельных проводников. Если в пазах располагаются стороны двух разных катушек (см. рис. 10, *б*), то между ними по высоте паза устанавливают прокладки *6*, изолирующие проводники разных катушек друг от друга. В лобовых частях между катушками разных фаз устанавливают междуфазовую изоляцию в виде прокладок из листового материала. Проводники обмотки закрепляются в пазах пазовыми крышками *3* или пазовыми клиньями *4*. Под клин устанавливают прокладку *5*.

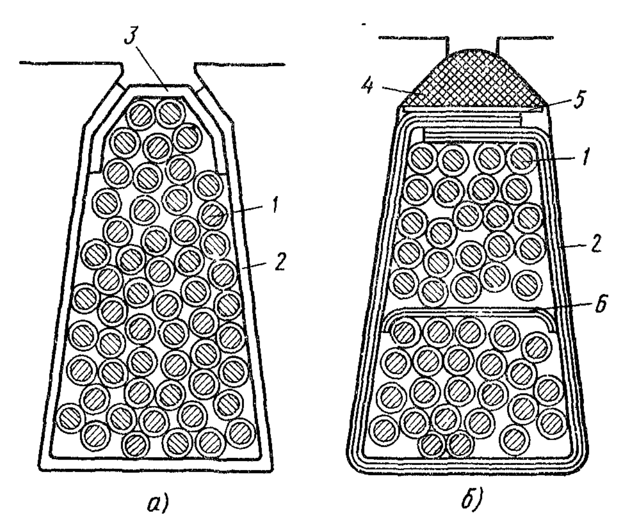
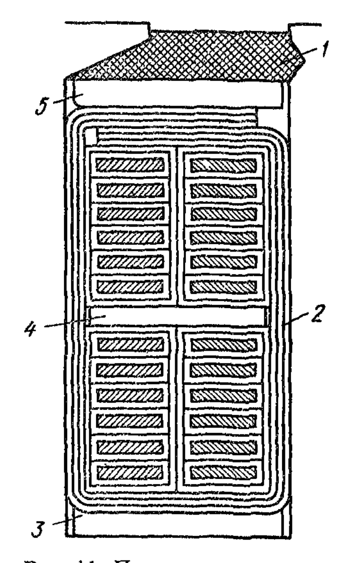


Рис 10 Поперечные сечения полузакрытых пазов с обмоткой машин

а — малой мощности, *б* — средней мощности

Статоры машин переменного тока с номинальным напряжением до 660 В при мощности более 100 кВт имеют полуоткрытые пазы (рис. 11), в которые укладывается обмотка из прямоугольного провода. Корпусная изоляция имеет такую же конструкцию, как и в обмотках из круглого провода. Изоляционный короб *2* устанавливается в пазы до укладки обмотки и состоит из нескольких слоев изоляционного материала. Обмотка закрепляется в пазу клином *1*. Помимо прокладок *4* между сторонами разных катушек в пазу устанавливают прокладки из механически прочного изоляционного материала на дно паза *3* и под клин *5*.

Обмотки всех машин на напряжение 3000 В и выше, а также машин специального исполнения на любое напряжение, например влагостойких, выполняются из прямоугольного провода и укладываются в открытые пазы (рис. 12). Катушки обмотки изолируются до укладки в пазы. Корпусная изоляция их пазовой части *6* может быть выполнена либо в виде сплошной гильзы, либо непрерывной намоткой ленточного изоляционного материала. Гильзовая изоляция имеет высокую электрическую и механическую прочность, но у нее есть существенный недостаток, связанный с тем,



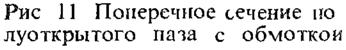


Рис 11 Поперечное сечение полуоткрытого паза с обмоткой

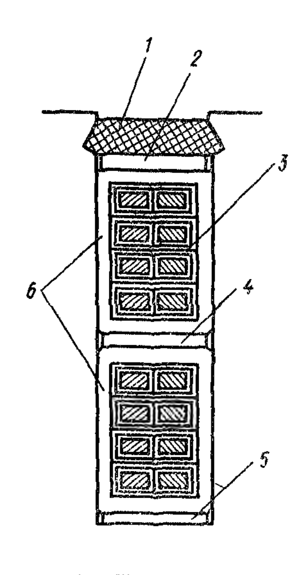


Рис 12 Поперечное сечение открытого паза с обмоткой

что гильзу можно выполнить только на прямолинейных участках катушек – их пазовых частях Изоляция лобовых частей выполняется непрерывной На стыках двух видов изоляции – гильзовой и непрерывной вблизи выхода прямолинейной части катушек из паза сплошной слой изоляции нарушается. Поэтому в местах стыков появляется наибольшая опасность пробоя изоляции При изготовлении катушек с гильзовой изоляцией приходится принимать специальные меры для обеспечения необходимой электрической прочности этих участков

Большинство обмоток высоковольтных машин делают с непрерывной изоляцией, которая накладывается и на пазовые и на лобовые части катушек. Ее выполняют из микаленты, стекломикаленты или из слюдинитовых лент. Лента накладывается вполнахлеста в несколько слоев. Число слоев зависит от номинального напряжения машины и может быть большим, например число слоев пазовой изоляции обмотки высоковольтной машины на напряжение 10 кВ достигает 10 – 12 Лобовую часть обмоток изолируют меньшим числом слоев той же ленты. Непрерывная изоляция катушек в большинстве случаев компаундируется. При этом в отличие от гильзовой изоляции образуется сплошной

непрерывный изоляционный слой по всей поверхности катушки

Между витками обмотки устанавливают витковую изоляцию *3* Она выполняется непрерывной по всей их длине в пазовой и лобовых частях витка или в виде прокладок между витками В открытых пазах устанавливают также прокладки на дно паза *5* и под клин *2* для предохранения корпусной изоляции от механических повреждений и между сторонами катушек по высоте паза *4* для создания между ними определенного расстояния в пазу и в лобовых частях Стороны катушек закрепляются в пазу клином *1*

§ 8. ПРОПИТКА ИЗОЛЯЦИИ

Во время хранения изоляционных материалов в их поры и капилляры проникает воздух из окружающей атмосферы При изготовлении обмоток между слоями их изоляции также остаются воздушные прослойки В то же время воздушные включения резко уменьшают теплопроводность, а при влажном воздухе также и электрическую прочность изоляции Поэтому изоляцию обмоток электрических машин пропитывают изоляционными лаками Во время пропитки лак проникает в поры материала и заполняет промежутки между слоями изоляции Изоляция приобретает монолитность, улучшаются ее теплопроводность, влагостойкость, электрическая и механическая прочность

Пропиточные лаки помимо их способности проникать в глубь изоляции и заполнять все поры и пустоты в ее слоях должны также хорошо просыхать по всей толщине изоляции, создавая на поверхности твердую упругую пленку с высокими электроизолирующими свойствами, и плотно скреплять витки обмотки друг с другом, т е иметь высокую цементирующую способность

Пропиточный лак состоит из загустевающей при сушке основы лака и растворителя – легко испаряющегося состава В рабочем состоянии лак жидкий и легко проникает внутрь изоляции, заполняя пустоты между слоями и поры изоляционного материала После пропитки во время сушки растворитель испаряется, а основа лака остается внутри изоляции

Бóльшая монолитность достигается пропиткой изоляции компаундами, т е компаундирование изоляции Компаунды – изоляционные составы на основе асфальтовых или эпоксидных смол – становятся жидкими при нагреве, без

растворителей. После предварительной сушки изолированных обмоток при пониженном давлении их пропитывают горячим компаундом под давлением — компаундируют. При остывании компаунд застывает, создавая монолитный механически прочный слой изоляции без воздушных включений. Из-за сложности процесса компаундирования по сравнению с пропиткой его применяют только в высоковольтных машинах или для обмоток специальных исполнений.

Для создания на поверхности изолированных деталей защитных пленок применяют покровные лаки и эмали. Нанесенные на поверхность деталей они при высыхании образуют тонкие прочные пленки, которые препятствуют проникновению влаги и паров масел в изоляцию. На гладкой поверхности покрытых эмалью или лаком деталей не задерживается пыль и грязь, проникающая в корпус машины из окружающего воздуха.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие требования предъявляют к изоляции электрических машин?
2. Что называется старением изоляции?
3. Какие классы нагревостойкости изоляции вы знаете?
4. Что такое гигроскопичность изоляции?
5. Зачем изоляцию обмоток пропитывают лаками или компаундами?
6. К каким классам нагревостойкости относятся провода ПЭВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК?
7. Какие способы наложения непрерывного слоя изоляции вы знаете?
8. Как работает механический обмотчик?
9. Поясните принцип работы челночной обмоточной головки.
10. Почему в машинах высокого напряжения не делают обмотку из круглого провода?
11. Из каких изоляционных материалов выполняют изоляцию обмоток машин высокого напряжения?

ГЛАВА III
ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 9. ВИДЫ ОБМОТОК

Конструкция катушек обмотки, расположение их в машине и схема соединения между собой зависят от назначения обмотки и типа машины. Катушки обмотки возбуждения состоят из большого числа витков. Они насаживаются на стальные сердечники, вместе с которыми образуют полюсы машины. Такие катушки называют полюсными.

Обмотки статоров синхронных машин, статоров и фазных

роторов асинхронных машин и якорей машин постоянного тока состоят из катушек с небольшим числом витков. Катушки равномерно распределяются по пазам сердечников, поэтому такие обмотки называют распределенными. В катушке распределенной обмотки статора машины переменного тока (рис. 13) различают прямолинейные (пазовые) части *3*, *5*, которые при укладке обмотки в машину размещаются в пазах сердечника, криволинейные лобовые части *2*, *4*, соединяющие ее пазовые части друг с другом, и выводные концы *1*, *6*, которыми называют начало первого и конец последнего витка катушки. Места перегибов в лобовых частях *7*, *8* называют головками катушек. Радиусы изгиба головок зависят от конструкции и размеров катушек и от напряжения машины. Длина прямолинейных частей катушек делается несколько большей, чем длина $l_{паза}$, и после укладки катушек их прямолинейные части всегда выступают из пазов с обоих торцов сердечника. Расстояние от торцов сердечника до начала изгиба лобовых частей катушки называется длиной вылета прямолинейной части катушек из пазов. Она также зависит от конструкции обмотки и напряжения.

В зависимости от типа обмотки в каждом пазу может располагаться или только одна пазовая сторона катушки, или две стороны разных катушек. В первом случае сторона катушки занимает весь паз (см. рис. 10, *а*). Такую обмотку называют однослойной. Во втором случае обмотка располагается в пазах в два слоя: в верхней части паза сторона одной катушки, в нижней – другой (см. рис. 10, *б*, 11, 12). Такая обмотка называется двухслойной.

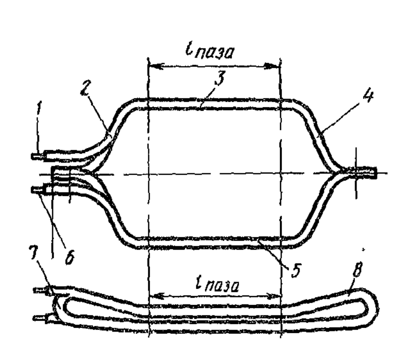


Рис. 13 Катушки распределенной обмотки статора

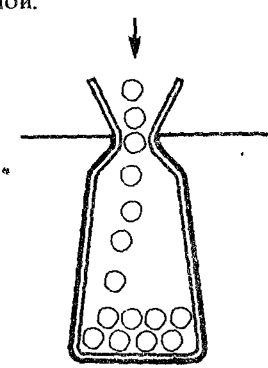


Рис. 14. Полузакрытые пазы статора для всыпной обмотки

По конструктивному исполнению, технологии производства и способам укладки в пазы катушки подразделяют на мягкие и жесткие. Мягкие катушки наматываются из круглого провода. Их укладывают в полузакрытые пазы (рис. 14), имеющие узкую прорезь – шлиц, через которую при ручной укладке обмотки опускают в паз поочередно каждый проводник катушки. Проводники как бы «всыпают» в пазы, поэтому обмотку из мягких катушек, намотанных из круглого провода, называют всыпной. Катушкам всыпной обмотки до укладки в пазы не может быть придана окончательная форма. Их лобовые части изгибают и формуют уже после того, как обмотка уложена и закреплена в пазах.

Жесткие катушки наматывают из прямоугольного провода. Их укладывают в пазы с параллельными стенками (см. рис. 11, 12). Жесткость прямоугольного провода больше, чем круглого, и катушкам уже в процессе изготовления до укладки в пазы придают окончательную форму со всеми характерными изгибами их лобовых частей (см. рис. 13). Катушки распределенной обмотки могут состоять из одного, двух или нескольких витков. Одновитковые катушки в некоторых типах обмоток делят пополам на два стержня (рис 15, *а* и *б*). Каждый стержень состоит из одной пазовой и двух половин лобовых частей. Такая обмотка называется стержневой. Стержни обмотки соединяются между собой в головках после их установки в пазы и образуют витки обмотки. Катушечные обмотки из прямоугольных проводов применяют в статорах машин средней и большой мощности, стержневые обмотки – в статорах крупных гидро- и турбогенераторов, роторах асинхронных двигателей и в якорях машин постоянного тока.

В электрических машинах применяют также неизолиро-

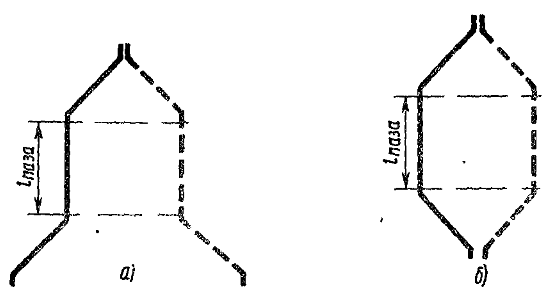


Рис 15 Стержни обмотки

ванную от корпуса обмотку – это обмотка короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей и демпферная (успокоительная) обмотка синхронных машин.

Короткозамкнутые обмотки образуются из неизолированных стержней, расположенных в пазах, и колец, замыкающих эти стержни по обоим торцам сердечника. Короткозамкнутые обмотки могут быть выполнены из вставных стержней или литыми. В обмотке из вставных стержней их выступающие из пазов концы ввариваются в замыкающие кольца или припаиваются к ним. В литых короткозамкнутых обмотках и стержни и замыкающие кольца образуются одновременно заливкой роторов алюминием или его сплавами. В короткозамкнутых роторах асинхронных двигателей применяют и тот и другой тип обмотки Успокоительную обмотку синхронных машин делают только из вставных стержней, которые размещают в пазах полюсных наконечников, и соединяют между собой по торцам полюсов

§ 10. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основные элементы обмоток. Обмотка статоров трехфазных машин состоит из трех (по числу фаз) совершенно одинаковых частей, которые называются фазами обмотки Фаза обмотки, в свою очередь, состоит из нескольких катушечных групп, в которые входят по несколько катушек Катушки, составляющие одну катушечную группу, соединяются всегда последовательно и согласно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно или параллельно и в зависимости от типа обмотки согласно или встречно. Схема соединения катушечных групп должна быть во всех фазах одна и та же. Чтобы правильно расположить катушки, окружность статора условно разделяют на равные участки по числу полюсов машины – полюсные деления (рис. 16). Длина полюсного деления обозначается греческой буквой «τ» $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, где D – внутренний диаметр статора, а $2p$ – число полюсов машины.

На каждом полюсном делении в наиболее распространенных типах обмоток располагаются стороны катушек каждой фазы, образующих один полюс обмотки, т. е. входящих в одну катушечную группу. Так как обмотки всех фаз должны быть одинаковы, то на каждом полюсном делении размещают стороны катушек трех катушечных групп разных

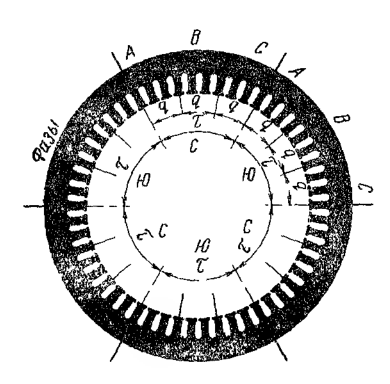


Рис. 16. Распределение пазов на полюсных делениях статора при $2p = 6$

фаз. Число пазов, занятых катушечными сторонами одной катушечной группы, называют числом пазов на полюс и фазу и обозначают буквой «q» (см. рис. 16). Таким образом, число пазов на каждом полюсном делении статора будет равно $3q$, а всего пазов в трехфазной машине $Z = 3q \cdot 2p = 6pq$.

Расстояние между сторонами катушки, уложенной в пазы, называется шагом обмотки. Он выражается не в единицах длины, а числом пазов, которые охватывает катушка, и обозначается буквой «y». Шаг обмотки показывает, через сколько пазов надо «шагнуть», чтобы от одной пазовой части катушки попасть к другой. Например, если $y = 6$ и одна сторона катушки лежит в первом пазу, то вторая должна находиться в седьмом пазу: $1 + 6 = 7$. Шаг обмотки может быть выражен только целым числом, так как пазовые части катушек должны обязательно располагаться в пазах. Шаг обмотки делают равным или близким полюсному делению. Если шаг равен полюсному делению, то его называют диаметральным. Обмотки с диаметральным шагом выполняют лишь в машинах малой мощности. В машинах средней и большой мощности шаг обмотки выполняют несколько меньшим, чем полюсное деление, т. е. его укорачивают. Это улучшает характеристику машины и несколько уменьшает длину лобовых частей катушек, а следовательно, и длину всей машины. Укороченный шаг $y = \beta\tau$, где β – коэффициент укорочения. В большинстве машин переменного тока $\beta \approx 0{,}8$.

Обозначение выводов обмоток. В обмотках статоров трехфазных машин имеется шесть выводных концов: три начальных и три конечных. Начала фаз обмоток должны быть расположены в соответствии с определенными правилами так, чтобы магнитное поле в машине было вращающимся. ГОСТ устанавливает следующие обозначения выводных концов: выводы обмоток статоров синхронных и асинхронных машин буквой С, обмоток роторов асинхронных машин – Р, обмоток возбуждения

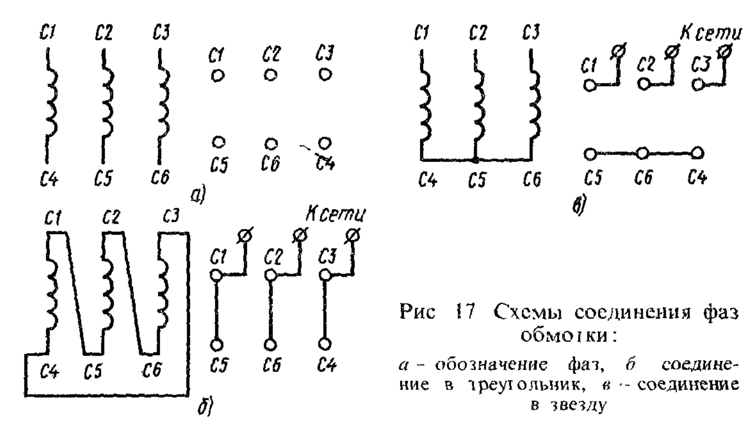


Рис 17 Схемы соединения фаз обмотки:

а – обозначение фаз, *б* соединение в треугольник, *в* – соединение в звезду

синхронных машин – И; начала и концы фаз обозначаются цифрами (рис. 17, *а*). Обозначение начал и концов обмоток статоров при шести выводах приведено в табл. 2.

Таблица 2. **Обозначение начал и концов обмоток статоров при шести выводах**

Названия выводов	Обозначение выводов	
	начало	конец
Первая фаза	C1	C4
Вторая »	C2	C5
Третья »	C3	C6

Обмотка каждой фазы рассчитывается на определенное напряжение, которое называют ее фазным напряжением. Оно должно быть равно одному из напряжений стандартного ряда, принятого в СССР и в большинстве стран мира. Такими напряжениями для низковольтных машин являются: 127*, 220, 380 и 660 В. Как видно, каждое из ряда этих напряжений выше предыдущего в $\sqrt{3}$ раз.

Фазы обмотки электрической машины можно соединить между собой в «треугольник» (условное обозначение Δ) или в «звезду» (условное обозначение ⅄). При соединении в треугольник (рис. 17, *б*) каждая из фаз подключается к полному напряжению сети. При соединении в звезду на каждую фазу приходится напряжение в $\sqrt{3}$ раза меньшее,

* Двигатели на фазное напряжение 127 В в новых сериях не выпускают.

чем напряжение сети (рис. 17,*в*). Это позволяет использовать одну и ту же машину при двух различных напряжениях в питающей сети. Например, двигатель с фазным напряжением обмоток 220 В, соединив фазы в треугольник, можно подключить к сети с напряжением 220 В, а соединив в звезду – к сети 380 В. Поэтому номинальное напряжение машины обозначается двумя цифрами: 220/380 или 380/660 В. По специальным заказам выпускают двигатели на напряжение 500 В. Такие машины могут работать только при одном напряжении, так как стандартного напряжения, в $\sqrt{3}$ раз отличающегося от 500 В, нет.

Если машина рассчитана на работу только при одном напряжении, то соединение фаз производят внутри машины. В этом случае трехфазная обмотка имеет только три или четыре выводных конца (четвертый вывод – от «нулевой» точки – места соединения концов фаз С4, С5 и С6). Обозначения выводов таких обмоток приведены в табл. 3.

Таблица 3 **Обозначение начал и концов обмоток статоров при трех или четырех выводах**

Схема соединения обмотки внутри машины	Число выводов	Названия выводов	Обозначения выводов
Звезда	3 или 4	Первая фаза Вторая » Третья » Нулевая точка	С1 С2 С3 0
Треугольник	3	Первый зажим Второй » Третий »	С1 С2 С3

Высоковольтные двигатели выпускаются на следующие напряжения: 3000, 6000 и 10000 В. Напряжение высоковольтных генераторов на 5% выше. Крупные гидрогенераторы и турбогенераторы выпускаются на напряжения 10,5; 13,8; 15,75; 18,0 кВ и выше. Такие машины предназначены для работы только при одном напряжении, в большинстве случаев при соединении схемы обмотки в звезду. Несмотря на это, все начала и концы фаз для подключения аппаратуры, контролирующей работу генераторов, выводятся из машины.

Обозначения наносятся непосредственно на выводы обмоток – на кабельные наконечники, шинные концы, на специальные обжимы, плотно закрепленные на проводах,

и, кроме того, на зажимы коробки выводов рядом с закрепленными выводами фаз. В малых машинах, в которых буквенное обозначение выводных концов затруднено из-за отсутствия места, допускается делать разноцветные выводы. Вывод С1 обозначается желтым цветом, С2 – зеленым, С3 – красным. Концы фаз С4, С5 и С6 обозначаются цветами тех же фаз, что и начала, но с добавкой черного. Вывод от нулевой точки (0) обозначается черным цветом.

Соединения фаз обмоток роторов асинхронных двигателей производятся внутри машины, и обмотка имеет только три вывода – начала фаз – Р1, Р2 и Р3. Вывод Р1 соединяется с наиболее удаленным от сердечника ротора контактным кольцом, а Р3 – с наиболее близким к сердечнику ротора контактным кольцом.

Выводы обмотки возбуждения синхронных машин обозначаются: начало – И1, конец обмотки – И2.

§ 11. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ОБМОТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотки якорей машин постоянного тока по своей конструкции отличаются от рассмотренных в предыдущем параграфе обмоток машин переменного тока. Основным элементом в них является не катушка, а секция, состоящая из одного или нескольких витков. Выводные концы каждой секции соединяются с пластинами коллектора. С каждой пластиной соединяется конец одной и начало другой секции, поэтому число пластин в коллекторе равно числу секций в обмотке. Обмотка якоря выполняется двухслойной. В каждом слое паза – верхнем и нижнем – располагаются стороны нескольких секций. Это делается для того, чтобы уменьшить число пазов в якоре. Секции, стороны которых находятся в одних и тех же пазах, конструктивно объединяются в катушку обмотки, выводными концами которой являются выводные концы секций (рис. 18). Таким образом, катушка, состоящая, например, из трех секций, имеет три пары выводных концов: три начала и три конца каждой секции. Так как с коллектором соединяются все секции, то число коллекторных пластин больше числа пазов якоря: $K = u_п Z$, где K – число пластин коллектора; $u_п$ – число секций в одной катушке или, что то же самое, число сторон секций, расположенных в одном слое паза якоря.

По направлению отгиба лобовых частей различают катушки петлевой и волновой обмоток (см. рис. 18). Они могут

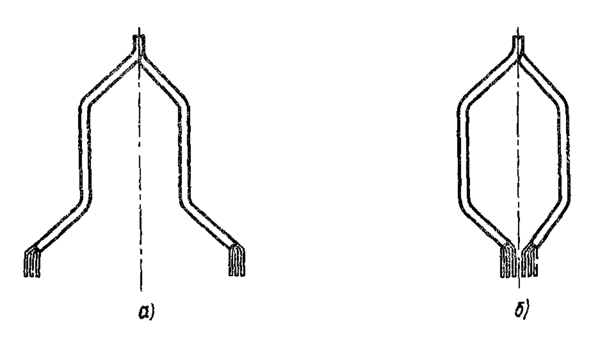


Рис. 18 Катушки якоря из трех секций

а – петлевой обмотки, *б* – волновой обмотки

выполняться из круглого или прямоугольного обмоточных проводов. Обмотки из круглого провода, так же как и в машинах переменного тока, называют всыпными. Всыпные обмотки укладываются в полузакрытые грушевидные пазы якорей машин мощностью до 20 – 30 кВт. Проводники всыпной обмотки располагаются в пазах без определенного порядка. Обязательным является только

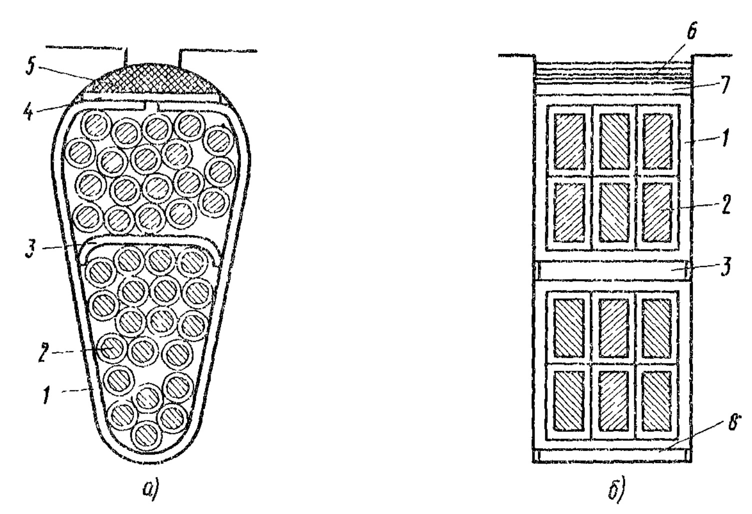


Рис 19. Разрез паза якоря

а – со всыпной обмоткой, *б* – с обмоткой из прямоугольных проводников, *1* – корпусная изоляция, *2* – проводники обмотки, *3* – прокладки между слоями обмотки, *4* – прокладка под клин, *5* – клин, *6* – проволока бандажа, *7* – прокладка под проволочный бандаж, *8* – прокладка на дно паза

разделение прокладкой сторон катушек, лежащих в верхнем и нижнем слоях паза (рис. 19, *а*), как и в двухслойных обмотках машин переменного тока.

Обмотку машин большей мощности делают из прямоугольного провода. Секции жесткой катушки обычно состоят из одного или нескольких витков. Одновитковые секции для упрощения их изготовления и укладки часто разделяют на два стержня и обмотку называют стержневой. Иногда обмотку из одновитковых секций также называют стержневой, несмотря на то, что она выполнена из цельных, неподразделенных на стержни секций.

В отличие от обмоток машин переменного тока проводники располагаются в пазу вертикально, большей стороной вдоль стенок паза (рис. 19, *б*). Проводники разных секций укладывают рядом друг с другом на одной высоте от дна паза, поэтому все секции имеют одинаковое индуктивное сопротивление. Во всех типах обмотки пазовая изоляция охватывает одновременно все секции одной катушки. Это является одной из причин объединения нескольких секций в одной катушке, а не установки каждой из них в отдельном пазу. Иначе пришлось бы изолировать от корпуса пазовые части всех секций в отдельности, что привело бы к излишнему расходу дорогостоящей изоляции и к увеличению места в пазах для размещения этой изоляции.

Обозначение выводных концов, наиболее часто встречающихся в машинах постоянного тока обмоток, приведено в табл. 4.

Таблица 4 **Обозначения выводных концов обмоток машин постоянного тока**

Названия обмоток	Обозначения выводов	
	начало	конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Параллельная обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Последовательная обмотка возбуждения	С1	С2
Независимая обмотка возбуждения	Н1	Н2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Компенсационная обмотка	К1	К2

Обозначения выводов должны быть выполнены так, чтобы при правом (по часовой стрелке) вращении якоря в режиме двигателя ток во всех обмотках протекал в направлении от начал обмоток (цифры 1) к их концам (цифры 2) Исключение составляет только обмотка последовательного возбуждения, если она включена как размагничивающая

В малых машинах, если места для буквенной маркировки недостаточно, допускается концы обмоток делать разноцветными Начало обмотки якоря обозначают белым цветом, начало обмотки последовательного возбуждения – красным, а параллельной обмотки возбуждения – зеленым Концы обмоток должны быть такого же цвета, что и их начала, но с добавлением черного, например, конец обмотки параллельного возбуждения обозначают зеленым и черным цветами и т д В машинах малой мощности дополнительных полюсов и компенсационных обмоток не устанавливают Поэтому ГОСТ не предусматривает цветовых обозначений для выводов обмоток машин малой мощности

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Что такое полюсное деление в машине переменного тока?

2 Что называют шагом обмотки?

3 Какой шаг называют диаметральным и какой укороченным?

4 Как должны быть соединены фазы обмотки двигателя если он рассчитан на 220/380 В, а напряжение питающей сети 380 В?

5 Сколько выводных концов может иметь катушка якоря машины постоянного тока?

6 Чем различаются катушки петлевой и волновой якорных обмоток?

7 Выводы какой обмотки в машине постоянного тока малой мощности обозначены белым и белым с черным цветами?

8 Какой вывод в обмотке машины переменного тока обозначается «0»? Нужно ли подсоединять его к сети при установке машины?

ГЛАВА IV

КАТУШКИ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 12. КАТУШКИ ВСЫПНОЙ ОБМОТКИ

Всыпная обмотка применяется в статорах наиболее распространенных электрических машин – низковольтных асинхронных двигателях мощностью до 100 кВт, а также в статорах синхронных машин той же мощности и напряжения Выпуск таких машин в нашей стране превысит в бли-

кайшее время 12—15 млн штук в год В то же время укладка всыпных обмоток вручную — трудоемкий процесс, связанный с необходимостью пропускать каждый проводник через узкий шлиц паза (см рис 14) Поэтому вопросу механизации намотки всыпных обмоток уделяется очень серьезное внимание

В процессе изготовления катушек всыпной обмотки, предназначенных для ручной укладки, катушки наматывают на шаблонах Простейший шаблон (рис 20) состоит из основания *5* и боковых планок задней *4*, наглухо соединенной с основанием, и съемной передней *1* Он собирается на шпинделе намоточного станка *3* и закрепляется гайкой *2*, которая плотно прижимает съемную боковую планку к основанию шаблона В собранном шаблоне боковые планки и основание образуют желоб, в который наматываются проводники *6* катушки Перед началом намотки в прорези шаблона устанавливают отрезки ленты для закрепления намотанных витков На приводном механизме смонтировано устройство для подсчета оборотов шпинделя, которое останавливает станок после намотки заданного числа витков провода После окончания намотки провод отрезают, намотанные витки скрепляют лентой, отсоединяют переднюю боковую планку шаблона и заготовку катушки снимают Чтобы проводники легче снимались с шаблона, поверхность его основания сделана с небольшим скосом в сторону передней боковой планки Размеры шаблона делают такими, чтобы средняя длина намотанного на него витка провода была равна средней длине витка уложенной в пазы катушки, ширина желоба — примерно ширине паза, а длина прямолинейной части основания — длине прямолинейной части катушки, т е несколько больше длины сердечника статора машины Натяжение обмоточного провода во время намотки должно

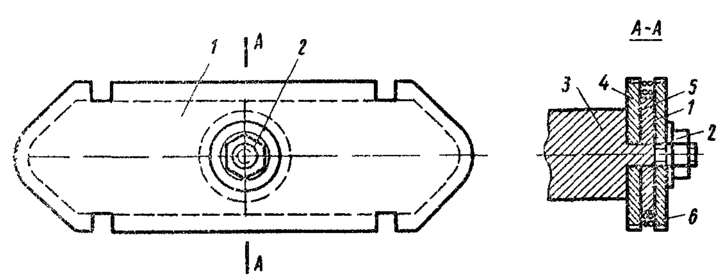


Рис 20 Простейший намоточный шаблон

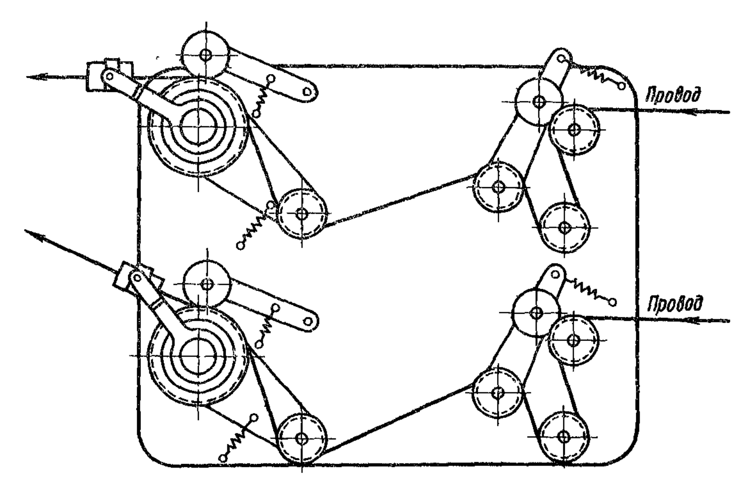


Рис 21 Натяжное устройство

быть строго определенным, так как при слабом натяжении проводники будут располагаться в шаблон неровно, а при слишком сильном провод растянется, его изоляция потрескается и потеряет электрическую прочность. Для создания нужного натяжения применяют различные устройства. Одно из устройств (рис. 21) состоит из нескольких установленных в оправку роликов, между которыми пропускают провод от барабана к шаблону. Оправка закреплена неподвижно. Натяжение провода регулируют подтормаживанием роликов. Чем свободнее вращаются ролики, тем меньше натяжение провода.

На заводах применяют также более сложные шаблоны, позволяющие наматывать несколько катушек последовательно, не обрезая провода. Обычно шаблоны рассчитаны для намотки катушек, составляющих одну или две катушечные группы, а в небольших машинах — всей фазы обмотки. Шарнирный шаблон (рис. 22) рассчитан на непрерывную намотку девяти катушек. Оправка шаблона ввертывается в резьбовое отверстие намоточного станка. Желобки для фиксирования положения проводников имеют только головки *1* и *2* шаблона. Головки съемные. Их можно заменять, чтобы наматывать катушки с большим или меньшим шагом, или изменять расстояние между ними, чтобы намотать катушки с другой длиной прямолинейной пазовой части. Для удобства съема намотанных катушек головки шаблона крепятся на шарнирах *3*. После окончания на-

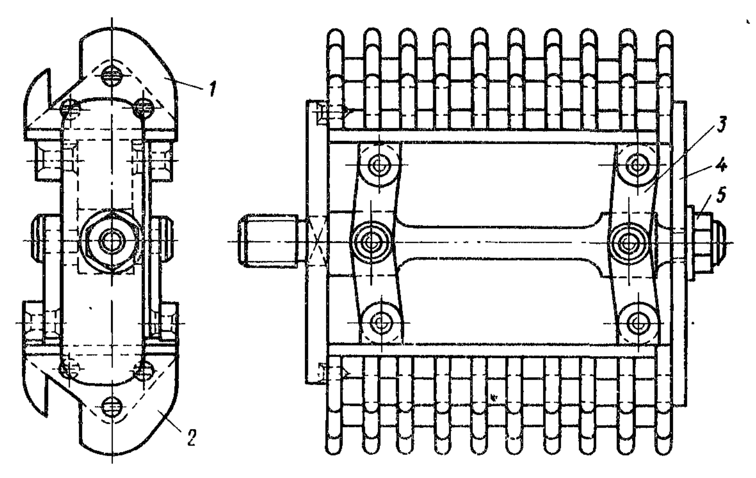


Рис. 22. Шарнирный намоточный шаблон

Рис. 23. Кинематическая схема намоточного станка

мотки всех катушек витки каждой катушки закрепляют лентой, ослабляют гайку *5* и снимают крепежную планку *4*, после этого все головки сдвигают в сторону. При этом шарниры складываются, головки сближаются и освобождают намотанные катушки.

Упрощенная кинематическая схема намоточного станка показана на рис. 23. Шарнирный шаблон *4* насаживается на полый шпиндель *1* станка. Внутри шпинделя проходит тяга *3*, связывающая поршень гидравлического привода *11* с шарнирным механизмом шаблона *5*. При движении поршня вправо головки шаблона сдвигаются к центру, освобождая намотанные катушки. При движении в обратном направлении головки вновь занимают рабочее положение. Шпиндель связан с приводным электродвигателем *8* ременной передачей *9*. Двигатель работает только в том случае, когда нажата ножная педаль *7*. Если педаль во время работы станка отпустить, двигатель отключится и сработает тормозное устройство *10*. Шпиндель остановится, но натяжение наматываемого провода сохранится. Станок оборудован счетчиком оборотов, механизмы которого *2* и *6* сблокированы с пусковым и тормозным устройствами двигателя, и останавливают станок после намотки заданного числа витков провода.

Катушечные группы однослойных концентрических обмоток состоят из катушек, имеющих разные размеры. Шаблоны для намотки таких катушечных групп также делают с разными размерами оснований (рис. 24) Шаблон для намотки катушек однослойной концентрической обмотки имеет число ступеней, равное числу катушек в группе. Каждая катушка наматывается на отдельную ступень.

Если всыпная обмотка должна быть выполнена не одним, а несколькими параллельными проводами, то они наматываются одновременно. Каждый провод сматывается с отдельного барабана и проходит через натяжное устройство. Натяг всех проводов должен быть одинаковый. Он обеспечивается регулировкой натяжных устройств. В асинхронных двигателях старых выпусков число параллельных проводов в обмотке доходило до 10—12, что вызывало трудности в размещении оборудования (10—12 барабанов с обмоточным проводом у одного станка одновременно) и в создании одинакового натяжения провода каждого из барабанов. В новой серии асинхронных двигателей 4А количество параллельных проводов в обмотке значительно меньше. Обмотка большинства машин малой мощности

состоит из одного-трех параллельных проводов и только, в двухполюсных двигателях мощностью несколько десятков киловатт она образуется из 5—6 параллельных проводов.

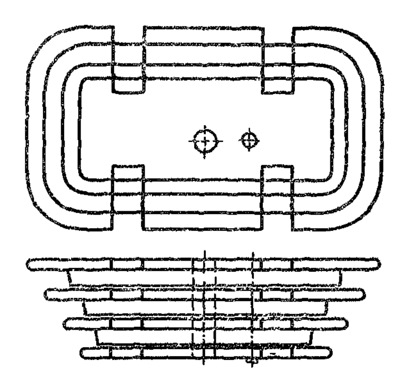


Рис 24 Шаблон для намотки катушек однослойной концентрической обмотки

Промышленность выпускает также полуавтоматические станки типа НГ, на которых установка шаблонов и съем намотанных катушек производятся вручную, а намотка провода с заданным натяжением, раскладка по желобу, переброс провода от одного ручья шаблона к другому и отсчет витков — автоматически. Для повышения производительности на некоторых станках этого типа, например станке НГ-4, на шпиндель устанавливаются сразу два намоточных шаблона, на которые одновременно наматывают катушки двух разных фаз обмотки.

§ 13. КАТУШКИ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

В статорах машин переменного тока мощностью более 100 кВт и в высоковольтных машинах всыпная обмотка неприменима. В таких машинах обмотка статора выполняется прямоугольным проводом. Прямоугольные проводники должны плотно прилегать один к другому по всей длине витка и занимать в пазу заранее определенное для каждого из них место. Поэтому обмотку из прямоугольных проводов укладывают только в пазы с параллельными стенками (см. рис. 11, 12). Катушкам еще до укладки в пазы придают окончательную форму с нужными изгибами в лобовых частях, поэтому процесс изготовления катушек обмотки из прямоугольного провода более сложен, чем для всыпной обмотки.

Кроме того, на катушки, которые укладывают в открытые пазы (см. рис. 12), в процессе их изготовления накладывают корпусную изоляцию.

Каждую катушку из прямоугольного провода наматывают раздельно на шаблоне, очертания которого напоминают «лодочку» (рис. 25). Такая форма дает возможность

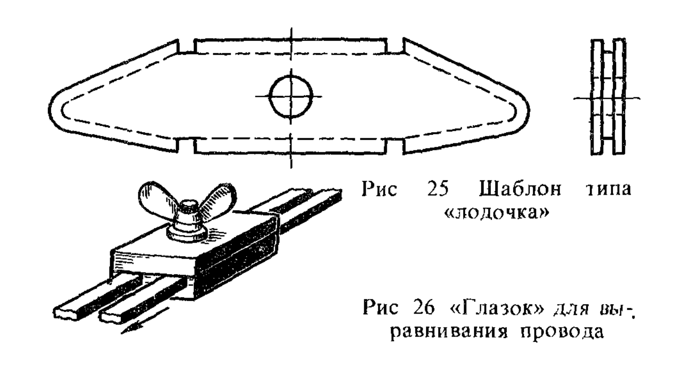


Рис 25 Шаблон типа «лодочка»

Рис 26 «Глазок» для выравнивания провода

получить определенные радиусы изгибов витков катушки и различную длину лобовых частей верхнего и нижнего слоев обмотки. Размеры желоба шаблона должны точно соответствовать ширине и высоте катушки без изоляции. Другие размеры шаблона — длина прямолинейной части, радиусы закруглений головок, длина и ширина всего шаблона — определяются расчетным путем исходя из размеров сердечника статора и обмотки, а также напряжения машины. В пазах статора прямоугольные проводники располагаются плашмя, широкой стороной параллельно дну паза. Так же они должны быть расположены и при намотке на шаблоне. Какие-либо перекосы или скручивание проводов недопустимы. Поэтому во время намотки между барабаном, с которого сматывается провод, и шаблоном помимо натяжного приспособления устанавливают «глазок» (рис. 26) — так называют две текстолитовые планки с углублениями, вырезанными точно по размеру провода. Провод, проходя через «глазок», выравнивается и ровно ложится в желобок шаблона. Во время намотки обмотчик контролирует правильность положения проводников в шаблоне и время от времени уплотняет уложенные витки ударами молотка через текстолитовую прокладку. После намотки нужного числа витков заготовка катушки — лодочка — скрепляется лентой в нескольких местах и снимается с шаблона. После этого лодочка по всему периметру плотно обертывается лавсановой лентой толщиной 0,05 мм или стеклолентой той же толщины, которая наматывается вразбежку. Непосредственно после намотки лодочки проводники в ней еще неплотно прилегают друг к другу и могут иметь незначительные искривления. Поэтому пазовые части заготовок обязательно опрессовывают

в прессах с подогревом, предварительно промазав витки изоляционным лаком. Катушку помещают в пресс и разогревают пресс-формы, не создавая давления. При нагреве лак размягчается и заполняет промежутки между проводниками. После этого создают давление и увеличивают температуру. Проводники катушки опрессовываются и прижимаются друг к другу. После определенной выдержки, во время которой лак затвердевает, температуру снижают и снимают давление. Когда лодочки после остывания вынимают из пресса, их пазовые части остаются прямыми и жесткими, так как затвердевший лак прочно скрепляет проводники между собой в том положении, какое им было придано в прессе. Режим опрессовки (давление, температура, продолжительность выдержки при определенной температуре) указывается в технологической карте и должен строго соблюдаться, иначе изоляция катушки получится некачественной.

Далее лодочка должна быть растянута так, чтобы ее ширина стала равна ширине уложенной в пазы катушки, т. е. шагу обмотки y, а угол α между боковыми гранями сторон – углу между осями пазов, в которых должны находиться стороны катушки (рис. 27). Принципиальная схема работы растяжного станка приведена на рис. 28. Прямолинейные части лодочки *1* и *2* устанавливаются в зажимы рычагов *3* и *4*, находящиеся в первоначальном положении *I*. Рычаги плотно прикреплены к зубчатым секторам *5* и *9*, которые системой сменных шестерен

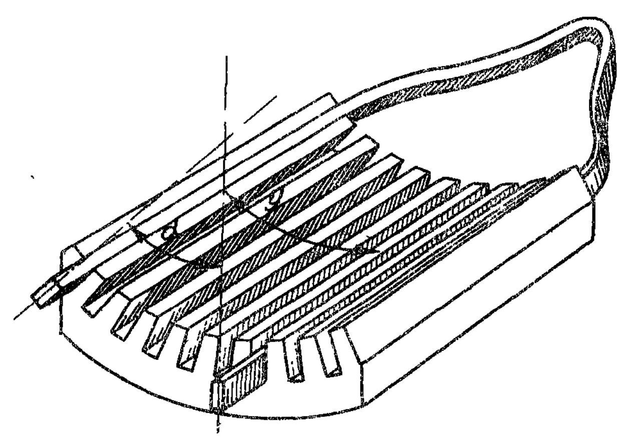


Рис 27. Положение сторон катушек в пазах

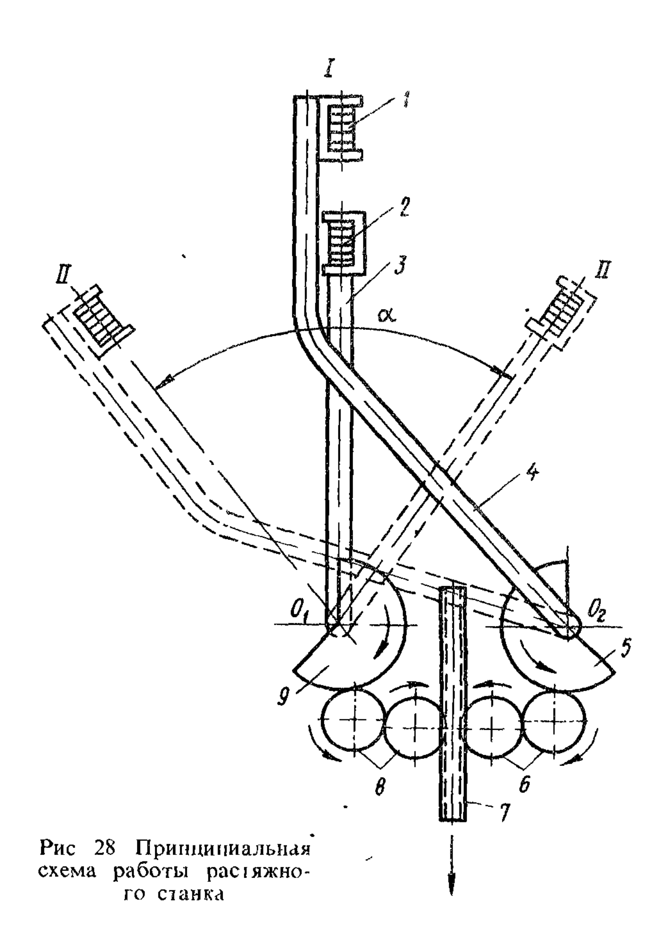


Рис 28 Принципиальная схема работы растяжного станка

6 и *8* связаны с подвижной рейкой *7*, имеющей двустороннюю зубчатость. При движении зубчатой рейки вниз шестерни и сцепленные с ними зубчатые секторы поворачиваются, одновременно поворачивая рычаги вокруг осей 0_1 и 0_2 на заранее определенный угол α (положение II) Заготовка катушки растягивается. Угол α между боковыми сторонами катушки может регулироваться длиной хода зубчатой рейки и сменой набора шестерен. Расстояние между сторонами растянутой катушки регулируется длиной рычагов.

Механизм растяжки лодочек устанавливается на растяжном станке (рис. 29) Это полуавтоматический станок, при-

водимый в движение сжатым воздухом. Стороны заготовки лодочки *3* крепятся пневматическими зажимами к рычагам *2* и *4*. Головки лодочки закрепляются также пневматическими зажимами передней *1* и задней *5* подвижных бабок, что предохраняет головки от деформации во время растяжки. Зубчатая рейка, поворачивающая рычаги, приводится в движение также с помощью пневматического привода, поворачивает шестерни и находящиеся в зацеплении с ними зубчатые секторы с рычагами на требуемый угол. По мере растяжки катушки передняя и задняя бабки с зажатыми в них головками катушки сходятся к середине станка, удерживая головки в первоначальном положении

Следующей операцией изготовления катушек является формовка их лобовых частей. Окончательная форма с нужными изгибами лобовых частей придается катушкам на макете, который называют формовочный или рихтовочный (рис 30). Пазовые части катушек устанавливают в желобки макета соответствующих размеров, а лобовые части отжимают, осаживают ударами деревянного молотка через прокладку до предназначенного для них положения на ма-

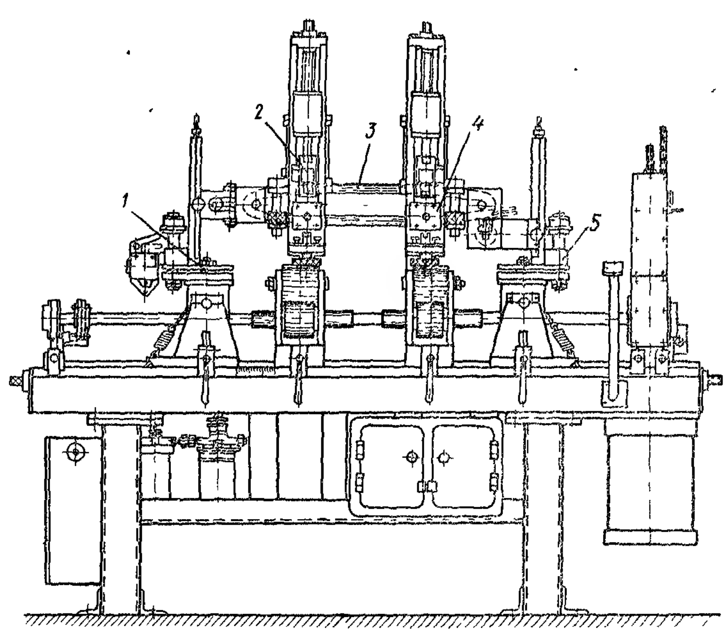


Рис. 29. Станок для растяжки катушек статора

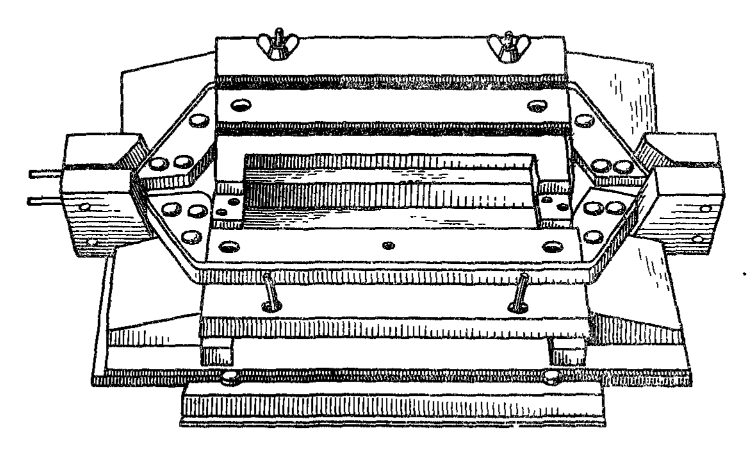


Рис 30 Рихтовочный макет

кете и рихтуют Катушки каждого типоразмера машин имеют строго определенные размеры прямолинейных частей, изгиб и длину лобовых частей Поэтому для каждого типоразмера должны быть свои формовочные макеты. Чтобы уменьшить их количество, макеты делают с раздвижными головками Это позволяет рихтовать на одном и том же макете катушки, имеющие одинаковые лобовые части, но разную длину пазовых частей

Катушки, которые укладывают в полуоткрытые пазы (см. рис 11), не изолируют, так как изолированную катушку нельзя пропустить через шлиц полуоткрытого паза. Их наматывают таким образом, чтобы перед укладкой каждую катушку можно было разделить по ширине на две части — две полукатушки. Пазовая изоляция обмотки с разделенными катушками имеет такую же конструкцию, как и в машинах с катушками всыпной обмотки, где изоляция не накладывается на катушку, а устанавливается в паз в виде изоляционного короба до укладки обмотки. Полукатушки располагаются в пазах машины одна рядом с другой и стороны каждой пары полукатушек должны плотно прилегать друг к другу и в пазовых и в лобовых частях. Поэтому лодочки наматывают сразу двумя проводами, укладывая их в шаблон рядом на одной высоте. После намотки лодочку разделяют на две проводники каждой из них скрепляют лавсановой лентой вразбежку и опрессовывают, как было описано выше Растяжку лодочек и рихтовку полукатушек на макете производят не

по одной, а парами так, как они располагаются в машине. После изготовления каждую пару полукатушек скрепляют между собой и передают на укладку обмотки.

Конструкция витковой изоляции зависит от мощности и напряжения машины. В машинах общего назначения мощностью до 200–300 кВт на напряжение до 660 В *дополнительную изоляцию между витками не ставят.* Ее роль играет проводниковая изоляция обмоточного провода. В низковольтных обмотках специального исполнения витковую изоляцию обычно выполняют в виде прокладок между витками в пазовых и лобовых частях катушек. Прокладки шириной, равной ширине провода, нарезают из гибкого миканита или стекломиканита и устанавливают во время намотки лодочек под каждый виток. После того как лодочка снята с шаблона, перед опрессовкой необходимо тщательно проконтролировать положение прокладок между витками.

В высоковольтных машинах для усиления изоляции между витками накладывают дополнительный слой непрерывной изоляции на обмоточный провод, из которого наматывается катушка. Непрерывную дополнительную изоляцию на обмоточный провод накладывают одновременно с намоткой заготовок катушек на шаблон. Для этой цели используют механический обмотчик (см. § 6), который устанавливают между барабаном с обмоточным проводом и намоточным шаблоном, и на шаблон наматывают провод с уже наложенной витковой изоляцией. Чтобы скорость движения провода через механический обмотчик была постоянной, шаблоны типа «лодочка» заменяют на круговые, в которых заготовка катушки наматывается в виде кольца. При равномерном вращении такого шаблона скорость сматывания провода с барабана и движение его через головку обмотчика остаются постоянными. Кинематическая схема станка ШЛМ для намотки заготовок катушек на круговой шаблон с одновременным наложением непрерывной витковой изоляции на провод показана на рис. 31. Станок работает следующим образом. Провод *2* с барабана *1* пропускается через ролики *3*, натяжное устройство и направляющее устройство, установленное на входе полой оси шпинделя *4*, к диску механизма – обмотчика *10*, поддерживающего ролики *6*, и закрепляется на круговом шаблоне *7*. Двигатель станка *9* через ременную передачу *8* приводит во вращение системы зубчатых передач *5* и *11*, сцепленных с механическим обмотчиком и с круговым шаблоном.

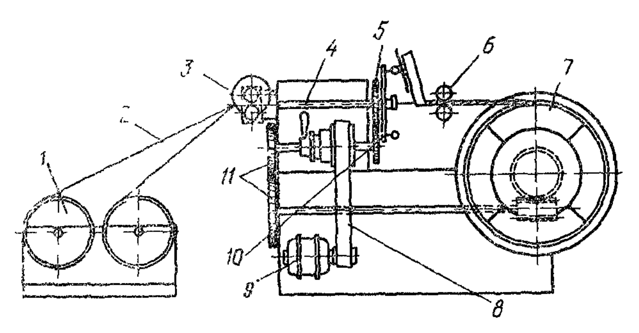


Рис 31 Станок ШЛМ

Передаточные отношения подбирают так, чтобы обеспечить нужный нахлест витков изоляции.

Если катушка наматывается из нескольких параллельных проводов (двух или четырех), то провода сматываются одновременно с нескольких барабанов (на рис 31 показаны два барабана), а витковая изоляция наматывается обмотчиком сразу на все параллельные провода.

Кольцевые заготовки перед всеми дальнейшими операциями растягиваются для придания им формы лодочки. На рис 32 показан растяжной станок для кольцевых заготовок. Заготовка надевается на шесть роликов, три из которых *1* расположены на неподвижной части стола *5*, а три других *2* – на подвижной каретке *3*, связанной с ходовым валом *6*. Приводной двигатель *7* вращает ходовой вал, каретка приходит в движение и надетая на ролики заготовка растягивается до тех пор, пока каретка, дойдя до концевого выключателя *4*, не выключит станок.

Корпусная изоляция обмоток большинства высоковольтных машин непрерывная компаундированная. Она накладывается из микаленты или из стекломикаленты по всей длине катушки, причем на пазовые части число слоев больше, чем на лобовые. Ручная намотка корпусной изоляции очень трудоемка, поэтому процесс изолирования почти на всех заводах механизирован. Вручную изолируют только головки катушек, так как небольшие радиусы изгиба головок не позволяют получить на изолировочных станках надежную изоляцию этих участков катушек.

Основной частью изолировочных станков является изолировочная головка, работа которой описана в § 6. Для изолирования катушек ширину разреза кольца головки (см. рис. 8) делают такой, чтобы в него проходила сто-

рона катушки; на кольце укрепляют два ролика с изоляцией. Это позволяет за один проход нанести сразу два слоя изоляции. Скорость движения обмоточной головки относительно катушки устанавливают так, чтобы лента наносилась на катушку с перекроем вполнахлеста. Для работы станка безразлично, будет ли двигаться катушка относительно головки или головка вдоль стороны катушки. Существуют изолировочные станки, работающие и по тому и по другому принципу. Обычно катушки небольших размеров изолируют на станках, в которых обмоточная головка неподвижна, а катушка перемещается. Для катушек больших размеров и стержней высоковольтных машин применяют станки другого типа На рис. 33 показана упрощенная кинематическая схема станка ЛШ-4 Катушка 2 обмотки закрепляется головками на каретке 5 в держатели 1 и 3. При этом одна из ее пазовых сторон вводится в разрез кольца обмоточной головки 4 и устанавливается в ее центре. Каретка и обмоточная головка приводятся во вращение от одного приводного двигателя 8 через редукторы 6 и 7. Подбором сменных шестерен редукторов устанавливают скорость перемещения каретки,

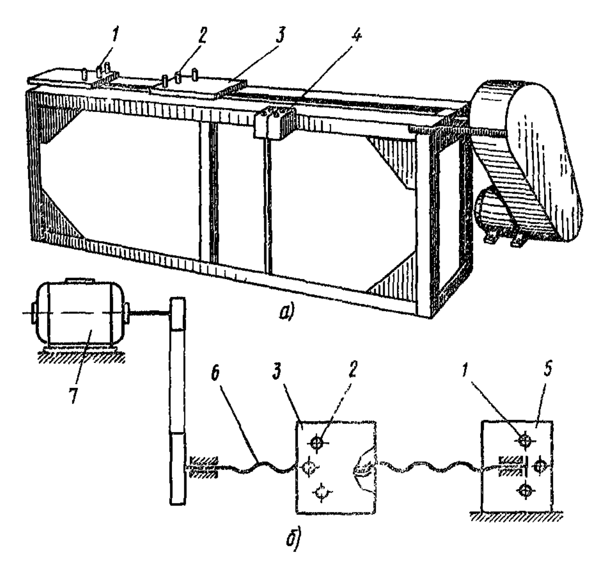


Рис 32 Станок для растяжки круговых заготовок
а – общий вид, *б* – кинематическая схема

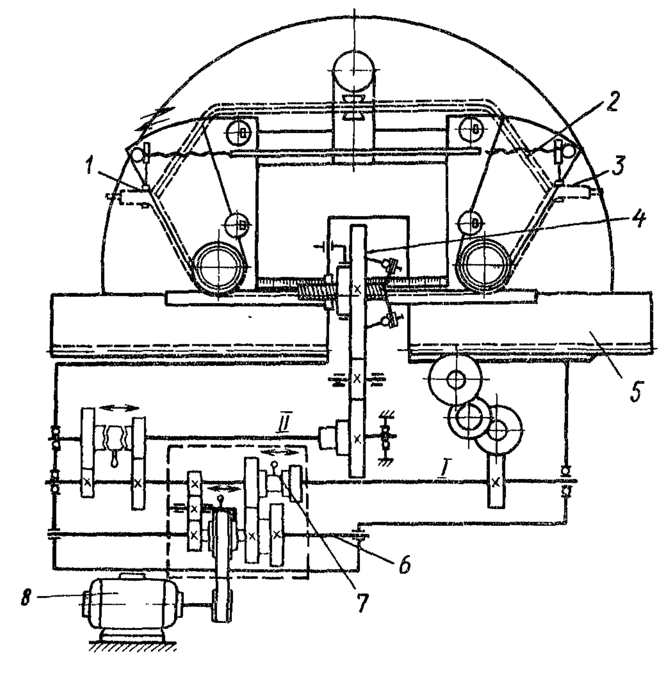


Рис. 33. Изолировочный станок ЛШ-4

соответствующую половине ширины изоляционной ленты за один оборот головки. Когда каретка, двигаясь в одном направлении, доходит до положения, при котором в центре обмоточной головки оказывается начало лобовой части катушки, зажимы, удерживающие катушку, изменяют свое положение. Катушка поворачивается и через обмоточную головку проходит изогнутая лобовая часть. На нее также накладывается изоляция. Когда к обмоточной головке подходит головка катушки, станок останавливается. После этого меняют направление движения и следующие слои изоляции накладываются при движении каретки в другую сторону. Направление вращения обмоточной головки остается прежним. Головки катушек изолируют вручную, сняв катушку со станка.

После нанесения корпусной изоляции катушка направляется либо в пропиточное отделение цеха для компаундирования, либо, если предусмотрено компаундирование обмотки, уложенной в пазы, – на укладку обмотки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите конструкцию шарнирного шаблона для намотки катушек всыпной обмотки

2. Чем отличается шаблон для намотки катушек однослойной концентрической обмотки от шаблона для намотки катушек двухслойной обмотки?

3. Для намотки каких катушек применяют шаблон типа «лодочка»?

4. Как работает механизм растяжки катушек из прямоугольного провода?

5. На каких приспособлениях формуют лобовые части катушек из прямоугольного провода?

6. Какую обмотку укладывают в полуоткрытые пазы статора?

7 Как работает станок ШЛМ?

8 Какие виды междувитковой изоляции обмоток вы знаете?

9. Опишите работу станка ЛШ-4.

ГЛАВА V

КАТУШКИ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 14. МЯГКИЕ КАТУШКИ ЯКОРЕЙ

Мягкими называют катушки всыпной обмотки, намотанные из круглого обмоточного провода. Они применяются в якорях машин постоянного тока приблизительно до мощности 20—30 кВт и при напряжении до 600 В. В якорях таких машин делают полузакрытые грушевидные пазы (см. рис. 19,*а*) с узкой прорезью, через которую пропускают в пазы проводники обмотки.

Всыпная обмотка укладывается в пазы якорей машин небольшой мощности механизированным способом на автоматических или полуавтоматических обмоточных станках. Обмоточный провод сматывается непосредственно с барабанов без предварительной намотки заготовок катушек. В более крупных машинах при ручной укладке обмотки сначала наматывают катушки якоря на шаблоны, имеющие такую же конструкцию, как и шаблоны для всыпной обмотки статоров (см. рис. 20).

Катушки якоря состоят из нескольких секций, имеющих одно и то же число витков и одинаковые размеры, поэтому для ускорения работы на шаблон наматывают не каждую секцию поочередно, а все секции одной катушки сразу. Обмоточный провод при этом сматывается с нескольких барабанов. Например, если в катушке всыпной

обмотки содержится три секции по пять витков в каждой, то на шаблон подают одновременно три провода от трех барабанов и делают пять оборотов шаблона. Если витки обмотки должны быть намотаны из нескольких параллельных проводов, то число барабанов соответственно увеличивают. Когда катушка наматывается одновременно с нескольких барабанов, необходимо обеспечить одинаковое направление и натяжение провода с каждого из них. Для этой цели применяют направляющие и натяжные приспособления. В направляющих устройствах провода со всех барабанов, расположенных либо рядом друг с другом, либо на различной высоте, выравниваются и поступают в натяжное устройство (см. рис. 21).

При одновременной намотке нескольких секций концы каждой из них маркируют, чтобы облегчить соединение уложенной обмотки с коллекторными пластинами. Для этой цели на выводные концы каждой секции надевают трубки из изоляционного материала – «чулки» разных цветов.

Во всыпной обмотке положение проводников каждой секции в пазу заранее не определено. Поэтому после намотки катушек проводники всех секций скрепляют в один пучок, но так, чтобы они располагались параллельно друг другу без перекрещиваний во избежание возможного повреждения проводниковой изоляции при укладке в пазы.

Секции обмотки якоря состоят из небольшого числа витков, поэтому время намотки катушки меньше, чем время, необходимое для снятия намотанной катушки с шаблона, сборки шаблона и закрепления на оправке концов новой катушки. Чтобы ускорить намоточные работы, обычно используют не один шаблон, а несколько, собранных на одном шпинделе станка. В этом случае после окончания намотки одной катушки ее витки закрепляют лентой, выпускают петли проводов и приступают к намотке следующей катушки на другом шаблоне, не отрезая проводов. Намотанные катушки снимают с оправок, поочередно разбирая шаблоны.

§ 15. ЖЕСТКИЕ КАТУШКИ ЯКОРЕЙ

В якорях машин мощностью более 20–30 кВт (в некоторых сериях более 12–15 кВт) применяют обмотку из прямоугольного провода. Ее укладывают в прямоугольные пазы якоря. Положение каждого проводника в пазу опре-

елено заранее (см рис 19, б) Проводники одной секции расположены друг над другом, а стороны разных секций в пазу — одна рядом с другой.

Намотка катушек производится на шаблонах, по своей конструкции аналогичных шаблонам для намотки катушек обмотки статора из прямоугольного провода (см. рис. 25) Чтобы проводники в катушке плотно прилегали друг к другу, на шаблон должны одновременно укладываться витки всех секций, составляющих одну катушку. Так, если катушка состоит из трех или четырех секций, то наматывают одновременно провода с трех или соответственно с четырех барабанов. Во время намотки обмоточные провода необходимо подправлять и подбивать ударами молотка через прокладку, особенно на закруглениях шаблона. Подбивать нужно одновременно провода всех секций, поэтому ширина прокладки должна быть равна ширине желоба шаблона

Шаблон для намотки устанавливают на шпинделе намоточного станка, обеспечивающего медленное вращение шаблона с большим усилием. Станок снабжен тормозом для мгновенной остановки шпинделя в любом положении. Секции обмотки из прямоугольного провода обычно состоят из одного, двух и реже трех витков Выводные концы двух- и трехвитковых секций, намотанных обычным способом, после укладки в пазы располагаются один в верхней части паза, а другой — вверху нижнего слоя обмотки, т е. в средней по высоте части паза (рис. 34, а) Это затрудняет их соединение с коллектором, так как выводной конец, выходящий из средней части паза, надо дополнительно изгибать, чтобы подвести его к коллекторной пластине и пропускать между другими проводниками в лобовых частях. Чтобы упростить процесс соединения с коллектором, секции с двумя и с большим числом витков наматывают особым образом, при котором выводные концы оказываются один в верхней части паза, а другой — в нижней. Это достигается перекрещиванием проводов в головке катушки со стороны, противоположной коллектору. Витки в этих головках располагаются рядом друг с другом, образуя как бы двойную головку и такие секции называют секциями с двойной головкой (рис. 34, б). Перекрещивание проводов выполняют при намотке на шаблоне. В местах перехода проводников из одного ряда в другой устанавливают дополнительную изоляцию, что является значительно более надежным по сравнению с перекрещива-

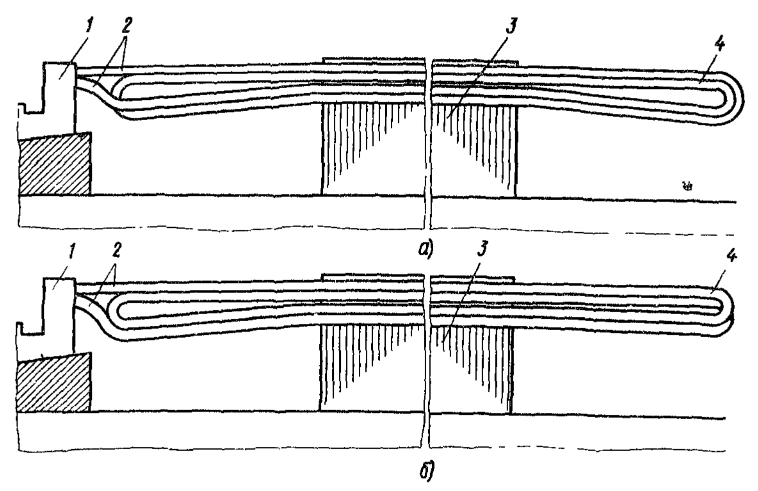


Рис 34 Расположение выводных концов двухвитковых секций
а — с одинарной головкой, *б* — с двойной головкой, *1* — пластины коллектора, *2* — выводные концы секций, *3* — якорь, *4* — головки секции

нием проводников уложенной обмотки в лобовых частях, как в обычных катушках.

Для намотки катушек с двойной головкой пользуются специальными шаблонами (рис. 35). Они отличаются от обычных шаблонов тем, что с одной стороны имеют один желоб для укладки головки катушки, а с другой — два. Первый виток наматывается как обычно на сердечник шаб-

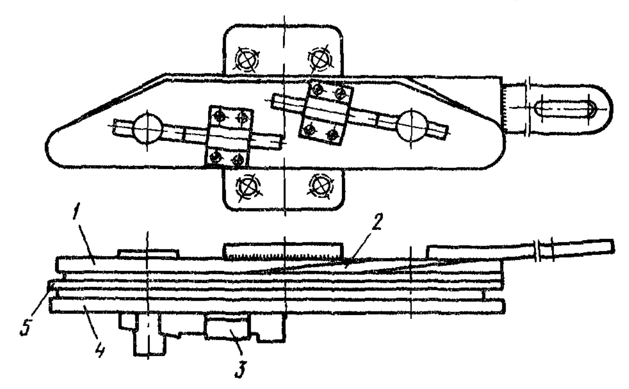


Рис. 35. Шаблон для намотки катушек с двойной головкой:
1 — задняя щека, *2* — наклонный паз, *3* — скобы для зажимных клиньев *4* — передняя щека, *5* — средняя перегородка

лона. При намотке второго витка провод по наклонно прорезанному пазу переходит на другую головку, после чего опять по такому же пазу возвращается в желоб шаблона и накладывается на провод первого витка. В местах перехода провода ко второй головке устанавливают дополнительную изоляцию. Каждая головка катушки сначала изолируется отдельно, потом между ними устанавливают изоляционные прокладки и обе головки вместе оплетают ленточным изоляционным материалом. В двухвитковых секциях двойная головка получается ровной. При трех витках в секции вторая головка образуется только у последнего витка, и лобовая часть становится несимметричной. Из-за того что ширина катушек с двойной головкой больше, чем обычных, они не могут поместиться на обмоткодержателях якорей малых диаметров. Катушки с двойной головкой применяют в якорях с диаметром более 150 мм.

В двух- и трехвитковых секциях устанавливают прокладки между витками. В лобовых частях прокладки обычно не ставятся. В машинах мощностью более 100 кВт для увеличения надежности средние секции паза изолируют лентой. Так, например, если в катушке содержится три секции, то средняя секция изолируется лентой по всему периметру и в пазовой, и в лобовой частях вполнахлеста. При нагревостойкости классов В и F для изоляции секции применяют стеклянную ленту ЛЭС толщиной 0,1 мм, при изоляции класса Н – ленту из полиамидной пленки ПМ толщиной 0,05 мм

Перед тем как снять намотанные катушки с шаблона, все проводники в пазовой и лобовой частях скрепляют лентой. После этого заготовки поступают на прессовку пазовых частей, пропитку в лаке и после сушки – на растяжку. Все секции, составляющие одну катушку, опрессовываются и растягиваются одновременно. Растяжные станки имеют такую же конструкцию, как и для катушек статоров машин переменного тока. Катушки растягивают до нужной ширины и одновременно их пазовым сторонам придают необходимый взаимный наклон, соответствующий положению катушек в пазах якоря, так же, как это делалось для жестких катушек обмотки статоров Окончательную форму катушки получат после изгибания их лобовых частей на гибочных приспособлениях. Катушки располагаются так, чтобы их лобовые части входили в желобы приспособления, один из которых предназначен для верхней стороны катушки, а другой – для нижней. Фигур-

ный пуансон пневматического пресса входит в желобы и изгибает одновременно обе лобовые части катушки. Готовая катушка поступает на изолировочный участок.

Корпусная изоляция катушек может быть гильзовая или непрерывная в зависимости от мощности машины, напряжения и типа обмотки. Гильзовая изоляция обмоток с небольшой длиной пазовой части в машинах на напряжение до 600 В делается мягкой, незапеченной. Мягкую гильзу изготовляют из гибкого листового материала. В зависимости от класса нагревостойкости изоляции применяют гибкий миканит, гибкий стекломиканит или слюдопласт.

Технологический процесс изготовления гильзовой изоляции такой же, как и для жестких катушек обмотки статоров машин переменного тока.

При непрерывной изоляции и пазовую и лобовую части катушки изолируют ленточным материалом в несколько слоев вполнахлеста. Для изоляции используют стекломикаленты или стеклослюдинитопластовые ленты для класса изоляции В и полиамидную пленку ПМ для классов изоляции F и H. Для придания большей механической прочности поверх слоев основной изоляции накладывают один слой вполнахлеста или впритык стеклянной ленты или для классов изоляции F и H — фениловой бумаги.

Катушки обмотки якоря после наложения непрерывной изоляции пропитывают лаками МЛ-92 и МГМ-8 при классе нагревостойкости изоляции В и F или кремнийорганическими лаками К-47 при классе H

В последние годы для пропитки обмоток якорей машин, работающих в тяжелых условиях, например тяговых двигателей электровозов, применяют компаунды на основе эпоксидных смол. Пропитку производят после укладки обмотки в пазы якоря.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается процесс намотки на шаблон катушки обмотки якоря машины постоянного тока от намотки катушек обмотки статора?
2. Зачем делают двойную головку в катушке обмотки якоря?
3. Опишите конструкцию шаблона для намотки катушек с двойной головкой.
4. На каких приспособлениях изгибают лобовые части секций якоря?

ГЛАВА VI
СТЕРЖНЕВЫЕ ОБМОТКИ

По своей конструкции и области применения различают стержни обмоток статоров машин переменного тока, стержни обмоток фазных роторов асинхронных двигателей и стержни обмоток якорей машин постоянного тока.

Стержневые обмотки в большинстве случаев выполняются двухслойными. Однослойные стержневые обмотки применяют лишь в специальных схемах обмоток машин переменного тока. В стержневых обмотках якорей машин постоянного тока после соединения двух стержней образуется одновитковая секция, в обмотках машин переменного тока — виток обмотки.

§ 16. СТЕРЖНЕВЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В двухслойной стержневой обмотке статора на каждую фазу приходится малое число витков. Поэтому стержневые обмотки применяют только в статорах машин больших размеров: турбогенераторах мощностью 25 мВт и более, мощных гидрогенераторах, синхронных компенсаторах и т. п. Обмотка таких машин имеет большую площадь поперечного сечения. Если стержни сделать из массивных проводников, то в них наведутся вихревые токи, электрические потери возрастут и обмотка перегреется. С уменьшением сечения проводников вихревые токи уменьшаются. Поэтому стержни обмотки делают не из массивных шин, а из большого числа параллельно соединенных изолированных друг от друга проводников (рис. 36) с площадью поперечного сечения не более 17—20 мм². Эти проводники называют элементарными. Чтобы токи в элементарных проводниках были одинаковые, нужно выровнять их

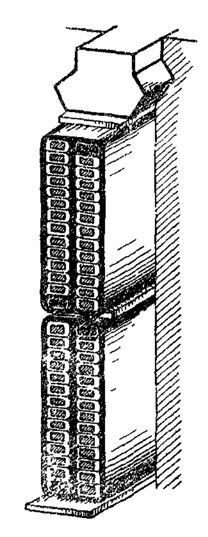


Рис 36. Стержни обмотки в пазу статора машины переменного тока

индуктивные сопротивления. В то же время индуктивное сопротивление проводника зависит от его положения в пазу машины. Чем ниже в пазу расположен проводник, тем больше его индуктивное сопротивление. Поэтому элементарные проводники стержней располагают не параллельно дну паза, а наклонно, и переплетают друг с другом так, чтобы каждый проводник занимал попеременно все возможные положения по высоте паза и все проводники находились бы в одинаковых магнитных условиях. Такая перестановка проводников называется транспозицией.

Стержень обмотки статора, состоящий из транспонированных проводников, показан на рис. 37. Один из элементарных проводников стержня на рисунке зачернен. Проследим за его положением на разных участках по длине стержня (поз. „*а*"). В лобовой части стержня (участок *AB*) все элементарные проводники располагаются параллельно друг другу. Зачерненный проводник находится вверху, в ближнем к нам столбике стержня. В начале пазовой части стержня (сечение *B*) проводник изгибается и переходит в другой столбик стержня, как показано на поз. «*б*» рисунка, и постепенно опускается вниз стержня (участок *BC*). Через расстояние *t* на его место по высоте стержня поднимается элементарный проводник, лежащий в лобовой части, ниже зачерненного. В конце участка *BC* зачерненный проводник снова изгибается, как показано на поз. «*в*», и опять переходит в первый столбик. На участке *CD* он постепенно поднимается до своего первоначального положения. В другой лобовой части стержня все элементарные проводники опять располагаются параллельно друг другу (участок *DE*). Таким образом, элементарный проводник в пазовой части транспонированного стержня делает как бы один полный оборот вокруг оси стержня. Все остальные элементарные проводники переплетаются таким же образом. Эта система переплетения стержней называ-

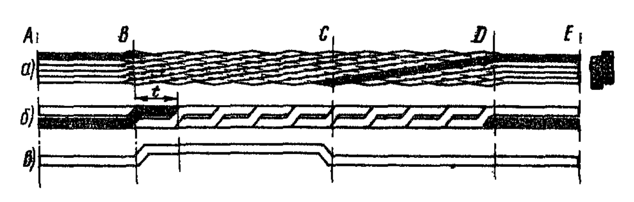


Рис 37 Транспонированный стержень

ется транспозицией 360°. Элементарные проводники при ней занимают поочередно все возможные положения в пазу по высоте стержня в обоих столбиках.

Для изготовления стержневых обмоток применяют провод ПСД, который поступает на завод в бухтах. Рихтовку и резку элементарных проводников нужной для изготовления стержней длины производят на полуавтоматических станках (рис. 38). Провод *9* сматывают с бухты *10*, установленной с торца станка. Конец провода заправляют между валками *4*, которые, вращаясь от приводного двигателя, подают провод вдоль поверхности приемного стола *2*. Перед валками провод пропускают через системы горизонтальных *8* и вертикальных *6* роликов, проходя через которые он выпрямляется и рихтуется. Взаимное положение роликов регулируют рукоятками *7* и *5* в зависимости от размера провода. На приемном столе установлен конечный выключатель *1*. Когда отрихтованный провод доходит до его упора, последний срабатывает и отключает приводной двигатель от валков. Движение провода прекращается. Одновременно срабатывает отрезной механизм *3*, отрезающий проводник нужной длины. Далее процесс повторяется. На современных станках после отрезки проводника производится также зачистка его концов от изоляции. Применяемые на заводах, выпускающих турбо- и гидрогенераторы, станки типа РЗП обеспечивают подачу провода размером от 1,55 × 5 до 3 × 15 мм со скоростью до 25,2 м/мин на длину до 9 м с одновременной зачисткой выводных концов от изоляции.

Перед плетением элементарных проводников в стержень их выгибают на пневматическом штампе в местах их перехода из столбика в столбик (см. сечения *B* и *C* на рис. 37, *в*). Изгибы на различных проводниках должны быть смещены на расстояние шага плетения *t* друг от друга (см. рис. 37, *б*). Чтобы изогнуть одновременно весь пучок проводников, составляющих один полустержень, их собирают (рис. 39) в столбик *3*, упирая торцами в гребенку *1*, длина уступов которой равна шагу плетения *t*, а высота — толщине элементарных проводников, и прижимают пуансоном *2*. Изогнутые проводники вынимают из штампа и выравнивают их торцы. Места изгибов проводников при этом сдвигаются один относительно другого на расстояние шага плетения. Плетут отдельно каждую половину стержня — полустержень, в который входят все элементарные проводники, занимающие один столбик в по-

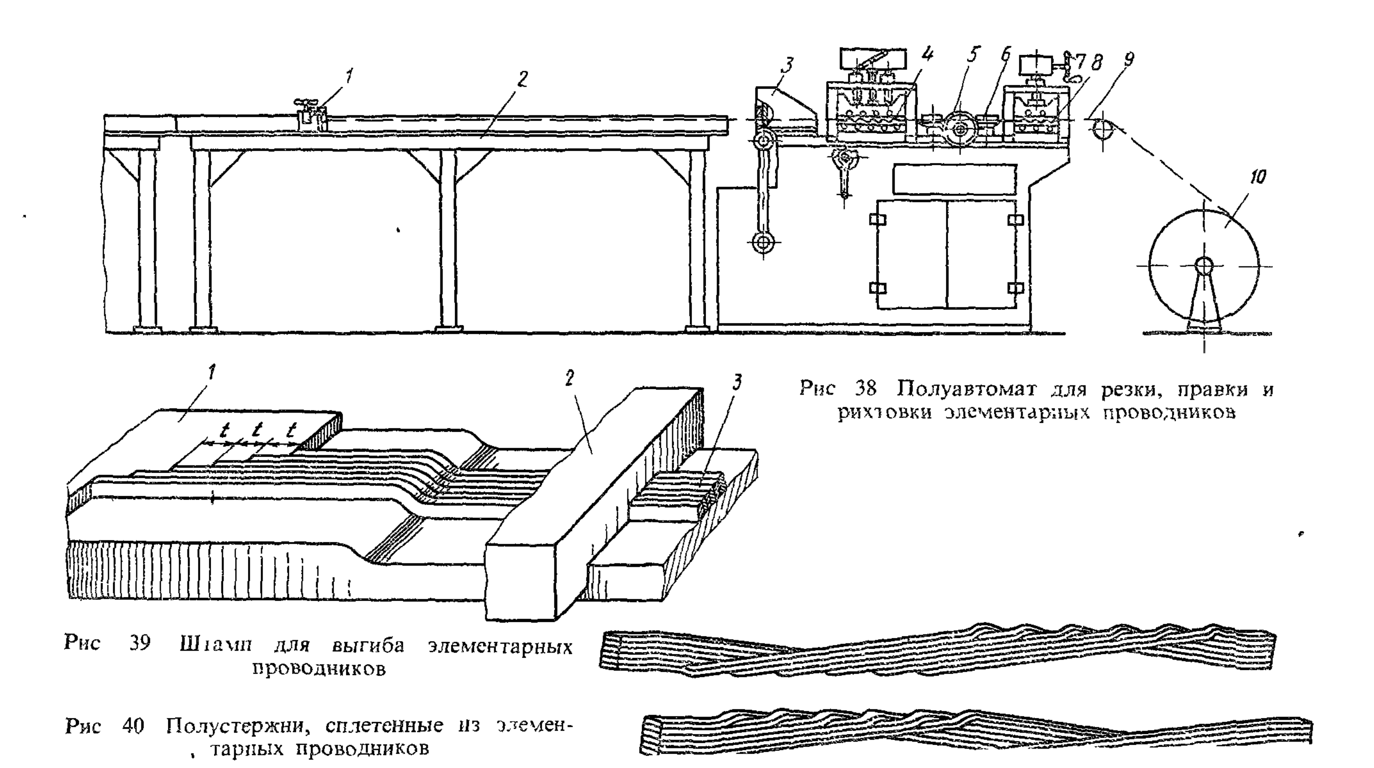


Рис 38 Полуавтомат для резки, правки и рихтовки элементарных проводников

Рис 39 Штамп для выгиба элементарных проводников

Рис 40 Полустержни, сплетенные из элементарных проводников

зовой части. Проводники скрепляют между собой скобой в середине полустержня и переплетают их от середины полустержня к его концам. Так же переплетают проводники второго полустержня. После того как оба полустержня переплетены (рис. 40), их соединяют вместе, устанавливая между столбиками вертикальную изоляционную прокладку из миканита толщиной 0,5 мм. Места перехода элементарных проводников из столбика в столбик дополнительно изолируют, прокладывая под проводники тонкие миканитовые прокладки.

Собранный плетеный стержень рихтуют, заполняют неровности, образовавшиеся в местах перехода проводников из одного столбика в другой полосками асбестовой бумаги, промазывают проводники клеящим лаком и опрессовывают пазовую часть. Опрессовка производится на гидравлических прессах с подогревом, чтобы придать монолитность пазовой части стержня. Для опрессовки длинных стержней обмотки турбогенераторов пресс составляют из нескольких блоков, число которых доходит до 10. В каждом блоке (рис. 41) смонтированы по два гидравлических цилиндра – вертикальный и горизонтальный. Давление от цилиндров передается на верхнюю *1* и боковые *3* планки пресс-формы. В пресс закладывают одновременно несколько стержней *2*. При опрессовке стержни нагревают, пропуская через нагревательные плиты пресс-форм пар с температурой 120 – 130 °С. После выдержки стержня под давлением в нагретом состоянии в течение 10 мин давление снимают, нагревательные плиты охлаждают, пропуская через них холодную воду, и стержни вынимают из пресс-форм.

При плетении, сборке и опрессовке стержней изоляция отдельных элементарных проводников может повредиться, поэтому после опрессовки пазовой части проверяют ее сохранность. Для этого достаточно убедиться в отсутствии замыкания между каждой парой элементарных проводников с помощью контрольной лампы, источника питания на 220 В и щупов. Для ускорения проверки разработана установка, на стойки которой укладываются испытуемые стержни. Концы их проводников вставляют в гнезда гребенки с контактами, соединенными с пакетными переключателями на панели управления. Поворотом ручек переключателей напряжение 220 В подается последовательно на каждую пару проводников. Если изоляция проводника повреждена, то загорается сигнальная лампа. Для определения места замыкания проводников используют приборы,

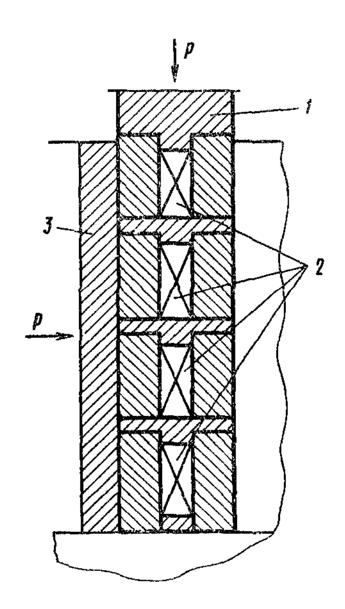


Рис 41 Пресс для опрессовки стержней

принцип работы которых основан на следующем. К концам замкнутых элементарных проводников от высокочастотного генератора подаются импульсы тока. Ток создает магнитное поле, которое улавливается индуктивным датчиком, смонтированным в передвижной головке. Головку передвигают вдоль стержней. Сигналы датчика через усилитель поступают в наушники. Они будут прослушиваться до тех пор, пока датчик не минует места замыкания проводников. По высоте стержня место замыкания определяют по интенсивности сигналов, опуская датчик вниз вдоль боковой грани стержня. Найденное повреждение изоляции устраняют и вновь проверяют изоляцию всех проводников стержня.

Лобовые части стержней изгибают и формуют на гибочных шаблонах. Обе лобовые части стержней турбогенераторов отгибают в одну и ту же сторону, так как в турбогенераторах выполняют петлевую обмотку. В многополюсных гидрогенераторах обмотка волновая и лобовые части стержней отгибают в разные стороны.

Устройство для гибки и формовки стержней гидрогенераторов (рис. 42) состоит из двух головок *3* и *16*, соединенных планкой *8*. Стержень *7* зажимается в приспособление с помощью прижимных планок *9* эксцентриковыми зажимами *10* и *17*. Лобовые части стержня изгибают нажимными планками *2* и *12*, которые поворачиваются под действием гидравлических цилиндров. Выводные концы стержня изгибаются рычагами *5* и *14*, связанными с поршнями гидравлических цилиндров *6* и *15*. Концы стержней подрезаются переносной дисковой фрезой. Откидные части *4* и *13* устройства отводятся в стороны поворотом вокруг осей *1* и *11*, и на концы стержней устанавливают приспособления для насадки наконечников.

В современных крупных турбо- и гидрогенераторах при-

3*

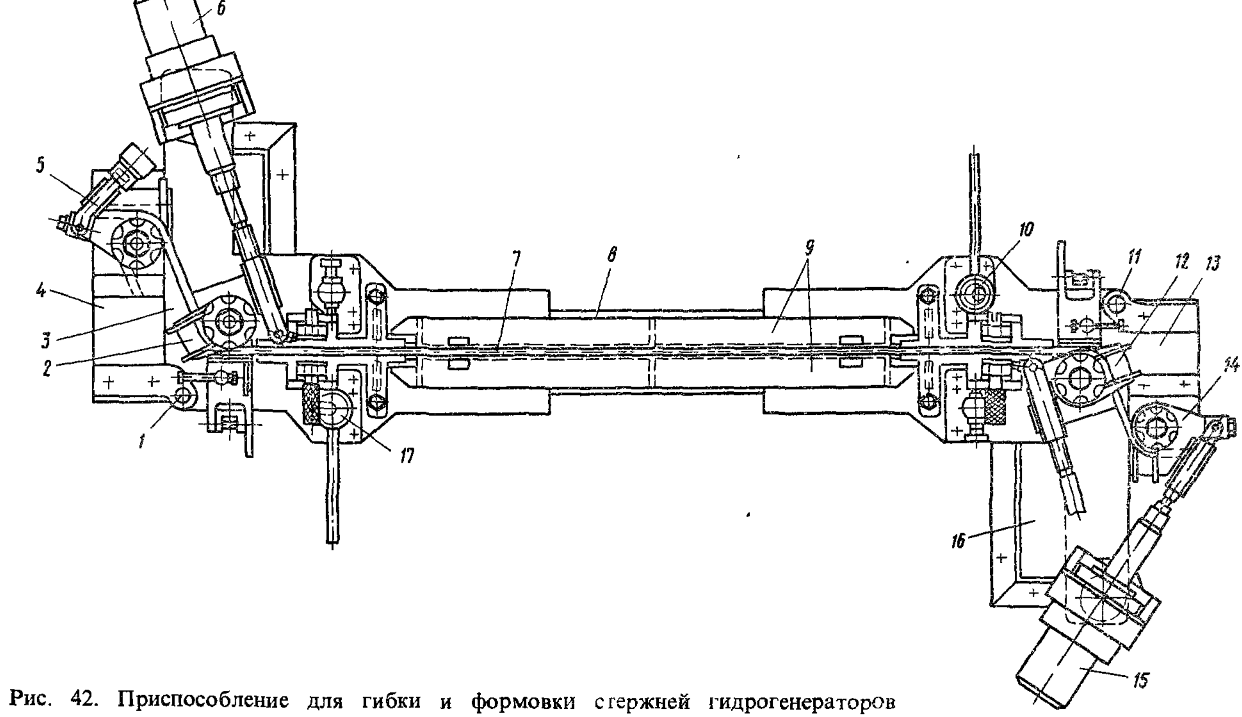


Рис. 42. Приспособление для гибки и формовки стержней гидрогенераторов

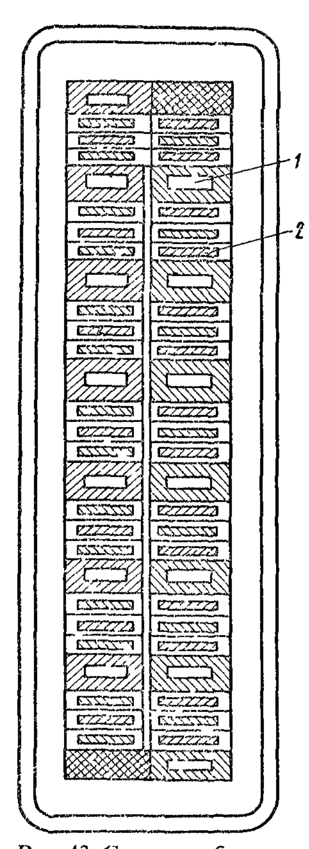


Рис 43 Стержни обмотки с непосредственным водяным охлаждением

1 — полые проводники *2* — обычные проводники

меняют непосредственное охлаждение обмоток статора водой Вода пропускается вдоль полых проводников и снижает их температуру практически до температуры охлаждающей воды, что позволяет значительно повысить плотность тока в обмотке и увеличить мощность машины, не меняя ее размеров Для стержней такой обмотки используют полые элементарные проводники Стержень обмотки с непосредственным водяным охлаждением (рис 43) состоит из элементарных проводников, часть которых выполнена из полой меди Вода, циркулирующая по их внутренним отверстиям, охлаждает не только эти проводники, но и соседние

Технология изготовления стержней с полыми проводниками такая же, как и со сплошными Добавляется только ряд операции по контролю герметичности стенок полых проводников и по контролю проходимости воды по внутренним каналам, так как в процессе изгибания проводников и лобовых частей стержня каналы могут оказаться сжатыми Герметичность стенок полых проводников и проходимость внутренних каналов проверяют два раза непосредственно после получения на заводе бухты провода и после изготовления и укладки стержней в пазы

Для пропускания воды через каналы в элементарных проводниках в уложенной обмотке к концам каждого стержня припаивают наконечники, которые служат одновременно и для соединения стержней между собой и для подвода охлаждающей воды (рис 44) Наконечник состоит из водораспределительной камеры *2*, в которую впаиваются концы проводников стержня *1*, штуцера *3* с резьбой для под-

ключения водопроводящих трубок и контактной пластины 4 для соединения головок стержней между собой. Водораспределительная камера медная, выполняется методом точного литья. Ее стенки должны выдерживать давление воды при работе машины, а контактная пластина должна иметь достаточную площадь поперечного сечения для пропускания тока стержня. Концы проводников стержня впаиваются в камеру серебряным припоем ПСр-45. Пайка должна обеспечивать водонепроницаемость и необходимую механическую прочность места соединения. Штуцер делают из нержавеющей стали и впаивают в камеру в среде защитного газа (аргона), что обеспечивает достаточно надежное соединение с медью наконечника.

После этого стержни поступают на изолировочный участок. Корпусная изоляция стержней высоковольтных

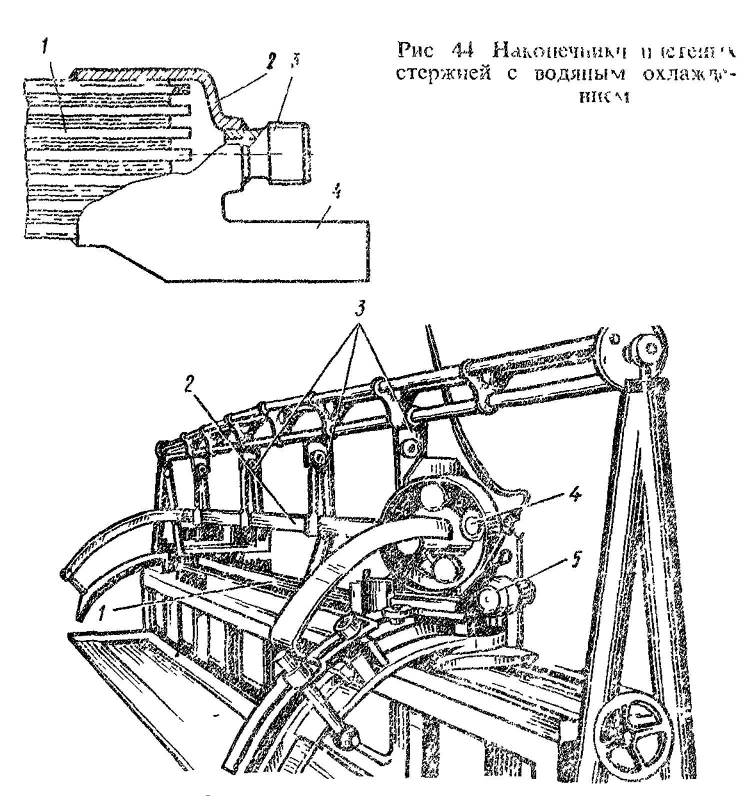


Рис. 44. Наконечники и стенки стержней с водяным охлаждением

Рис. 45. Станок ЛУС-6 для изолирования стержня

машин выполняется непрерывной из микаленты с последующей компаундировкой в битумных лаках (изоляция класса В) или типа «монолит» из слоев слюдинитовой ленты, пропитанной в эпоксидном компаунде. И при той и при другой конструкции изоляции ленточный изоляционный материал накладывается на стержень вполнахлеста в несколько слоев. Операция наложения микаленты или слюдинитовых лент на стержни обмотки механизирована Стержни изолируются на изолировочных станках типа ЛУС или ЛШ. На рис. 45 показан станок ЛУС-6 с установленным на нем стержнем турбогенератора. Стержень *2* укладывается концами на кронштейн и закрепляется на стержнедержателях *3*. Вдоль станка по копиру *1*, повторяющему очертания стержня, двигается каретка *5* с изолировочной головкой *4*. Вдоль всего копира устанавливается зубчатая рейка. Она имеет сменные участки, подбор которых позволяет настроить копир на определенный размер стержня· прямолинейные части и закругления, соответствующие изгибу стержня в лобовых частях На изолировочной головке укреплены четыре рулона с установленными в них лентами изоляции. Каретка движется вдоль стержня в одну и в другую сторону несколько раз При подходе каретки к стержнедержателю он автоматически раскрывается, освобождая путь обмоточным головкам, а после прохода каретки снова захватывает стержень К изолированному стержню для предохранения его от деформации привязывают металлическую Г-образную рейку, снимают его со станка и передают на компаундирование. В стержнях обмотки с непосредственным водяным охлаждением в припаянные наконечники ввертывают заглушки, чтобы исключить возможность затекания компаунда в каналы полых проводников.

После компаундирования готовые стержни поступают на испытательную станцию для измерения электрической прочности изоляции и оттуда в обмоточный цех для укладки в пазы статора.

§ 17. СТЕРЖНЕВЫЕ ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Фазные роторы асинхронных двигателей мощностью более 80—100 кВт делают с двухслойной стержневой обмоткой. В каждом пазу размещаются по два стержня — по одному стержню в верхнем и нижнем слоях. Их делают из медных шин, не подразделяя на элементарные проводники.

Стержневые обмотки роторов всегда волновые, так как в них меньше междугрупповых соединений, чем в петлевых

Большая механическая жесткость стержней позволяет устанавливать их в полузакрытые или закрытые пазы, проталкивая с торца ротора Поэтому при изготовлении стержней изгибают только одну их лобовую часть. Вторая лобовая часть выгибается после установки стержней в пазы. Изгиб первой лобовой части в двух местах (при переходе от прямолинейной части стержня к лобовой и отгиб конца стержня) производят на гибочных станках с ручным или пневматическим приводом

Пневматический станок для изгибания роторных стержней (рис 46) имеет два пневматических цилиндра. с вертикальным *1* и горизонтальным *10* ходом поршня. Прямую заготовку стержня *8* устанавливают в паз, образованный двумя сменными накладками *6* и *9* матрицы Пуансон *2*, приводимый в движение поршнем вертикального цилиндра, опускается и выгибает лобовую часть стержня на ребро, прижимая ее к поверхности матрицы. После этого сжатый воздух подается в горизонтальный цилиндр, поршень которого соединен с зубчатой рейкой *4* Рейка, перемещаясь, поворачивает зубчатое колесо *5* и коромысло *3* Коромысло, в свою очередь упираясь шипами в рычаги *11* и *7*, повора-

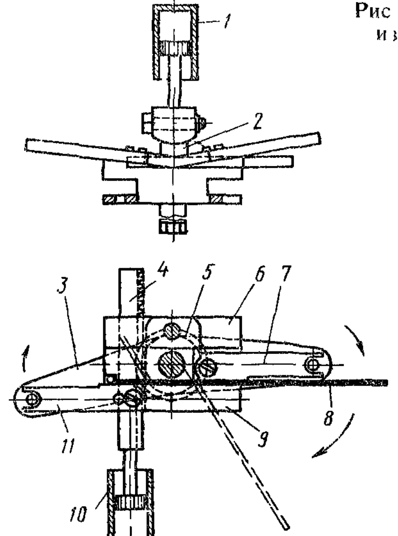


Рис 46 Пневматический станок для изгиба лобовой части стержня

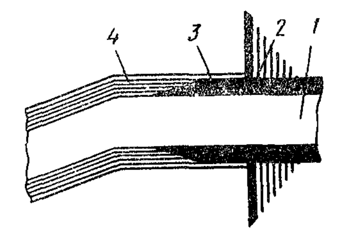


Рис 47 Соединение пазовой и лобовой изоляции стержня ротора

1 – стержень, *2* – сердечник ротора, *3* – гильзовая изоляция пазовой части, *4* – непрерывная изоляция лобовой части

чивает их и изгибает лобовую часть и выводной конец стержня. После снятия давления оба поршня возвращаются в исходное положение, и стержень освобождается. Угол отгиба лобовой части регулируется величиной хода зубчатой рейки. Для изменения длины лобовой части стержня устанавливают соответствующие накладки.

После изгибания лобовой части концы стержней лудят, опуская в ванну с расплавленным припоем, а затем передают на изолировочный участок.

Пазовая изоляция стержней роторов выполняется гильзовой, а лобовая – непрерывной. Для гильзовой изоляции применяют микафолий или слюдопластофолий (класс нагревостойкости B) или синтофолий (классы нагревостойкости F и H). Заготовку изоляции вырезают по форме трапеции, большее основание которой на 10–15 мм больше другого. Высота трапеции зависит от того, сколько раз должна быть обернута изоляция вокруг стержня. Толщина пазовой изоляции обмотки определяется напряжением на контактных кольцах ротора. Поэтому точное число оборотов заготовки изоляции пазовой части стержня указывается в технологической карте. Обычно в машинах с низким напряжением на контактных кольцах делают 3–4 оборота, при напряжениях выше 1200 В изоляцию обертывают вокруг стержня 9–10 раз.

Заготовку изоляции расстилают на плите и подогревают, при этом лак размягчается и изоляция становится гибкой. Стержень прижимают к заготовке изоляции и обертывают нужное число раз, поворачивая за отогнутую лобовую часть. Кромки изоляции образуют конические поверхности (рис. 47), на которые в дальнейшем будут заходить витки непрерывной изоляции лобовых частей.

После обертывания изоляцию пазовой части уплотняют, обкатывая в горячих утюгах на обкаточных станках (рис. 48). Пазовую часть стержня *2* помещают в углубление фасонного утюга *3* с электрическим подогревом и прижимают сверху утюгом *1*, который может совершать вертикальные колебательные движения, все время поджимая стержень к нижнему утюгу. Отогнутая лобовая часть стержня зацепляется выступом планшайбы *4*, которая приводится во вращение от электродвигателя *5* через систему понижающих частоту вращения передач *6*. При включении станка планшайба вращает стержень и изоляция пазовой части плотно укатывается.

После обкатки пазовая изоляция опрессовывается в пресс-

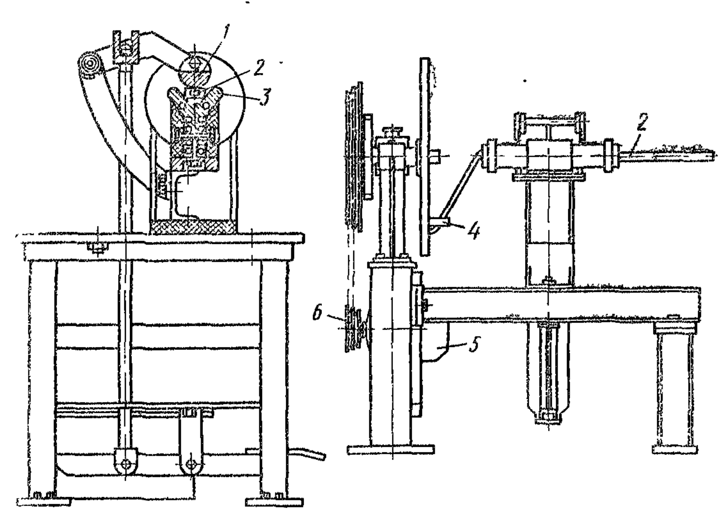


Рис 48 Обкаточный станок

...ах с подогревом, конструкция которых аналогична показанной на рис. 41. В прессах происходит опрессовка и запечка гильзовой изоляции, в результате чего она приобретает высокую монолитность, механическую и электрическую прочность и влагостойкость.

Лобовые части стержней изолируют после опрессовки и выпечки пазовой изоляции. Изоляция из ленточного материала вполнахлеста накладывается на обе – изогнутую и прямую – лобовые части стержня. Эта работа выполняется вручную. Особое внимание следует уделять местам стыка пазовой (гильзовой) и лобовой (непрерывной) изоляции. Слои непрерывной изоляции должны плотно заходить на конусную часть гильзы, но утолщение общего слоя изоляции в этих местах недопустимо, так как неизогнутая лобовая часть стержня в процессе укладки должна проходить внутри паза вдоль всего ротора.

§ 18. СТЕРЖНЕВЫЕ ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В пазу, заполненном стержневой обмоткой (рис. 49), проводники секций располагаются своей широкой стороной параллельно боковым сторонам паза, поэтому в головках их необходимо выгибать на ребро. Причем изгибают одно-

временно все секции, из которых состоит одна катушка, иначе они не будут плотно прилегать друг к другу по всему периметру пазовых и лобовых частей. Изгиб на ребро сразу нескольких проводников требует значительно бо́льших усилий, чем изгиб на широкую сторону, поэтому изгибание цельных секций стержневой обмотки производят в два приема. Сначала на гибочных станках (рис. 50) выгибают головки

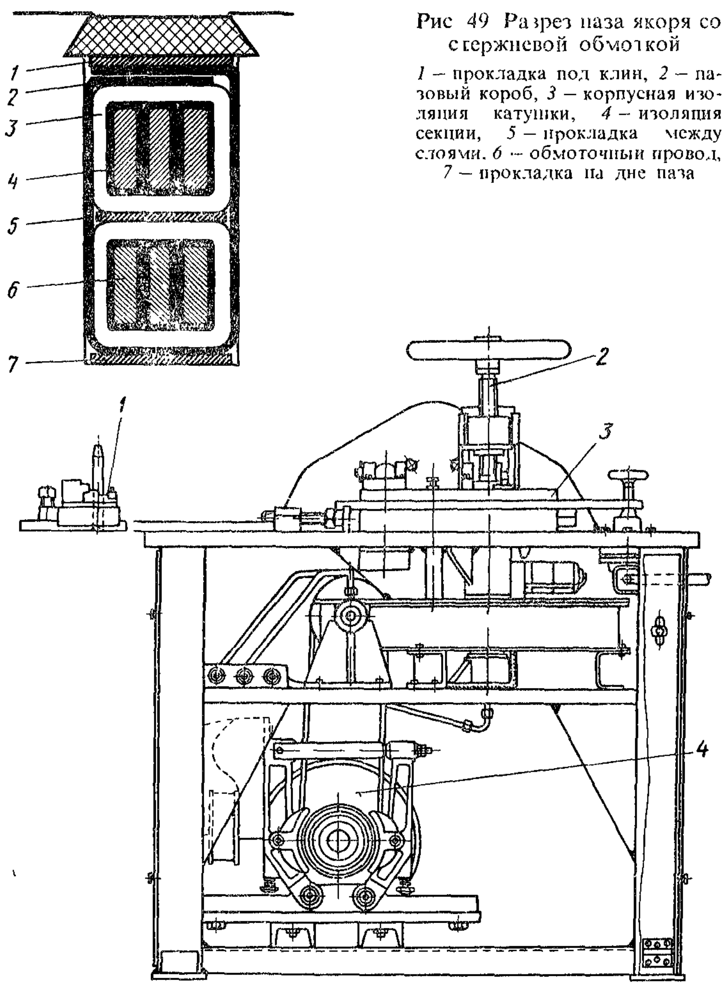


Рис 49 Разрез паза якоря со стержневой обмоткой

1 – прокладка под клин, 2 – пазовый короб, 3 – корпусная изоляция катушки, 4 – изоляция секции, 5 – прокладка между слоями, 6 – обмоточный провод, 7 – прокладка на дне паза

Рис 50. Станок для выгиба головок одновитковых катушек

секций. Проводники секций, составляющих одну катушку, закладываются плашмя в паз между оправкой *5* и подвижной планкой *6*. Торец пакета проводников упирается в передвижной упор *1*, положение которого регулируется в зависимости от длины проводников. Оправка имеет округленную поверхность с радиусом, равным радиусу закругления головки секции. Подвижная планка соединена с горизонтально расположенным пневматическим цилиндром *7*. После установки в станок пакета проводов они прижимаются ко дну паза верхней плитой *3* с помощью винта *2*. В цилиндр подается сжатый воздух, и подвижная планка *6* зажимает все проводники с боковой поверхности. Для изгиба проводников включают электродвигатель *4*, который через систему червячных передач поворачивает вал и шестерню с выступающим роликом *8*. Ролик упирается в поворотный клин *9*, изгибает пакет проводов вокруг оправки *10* на 180°. Так как пазовая прямолинейная часть проводов зажата плитами в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а в месте

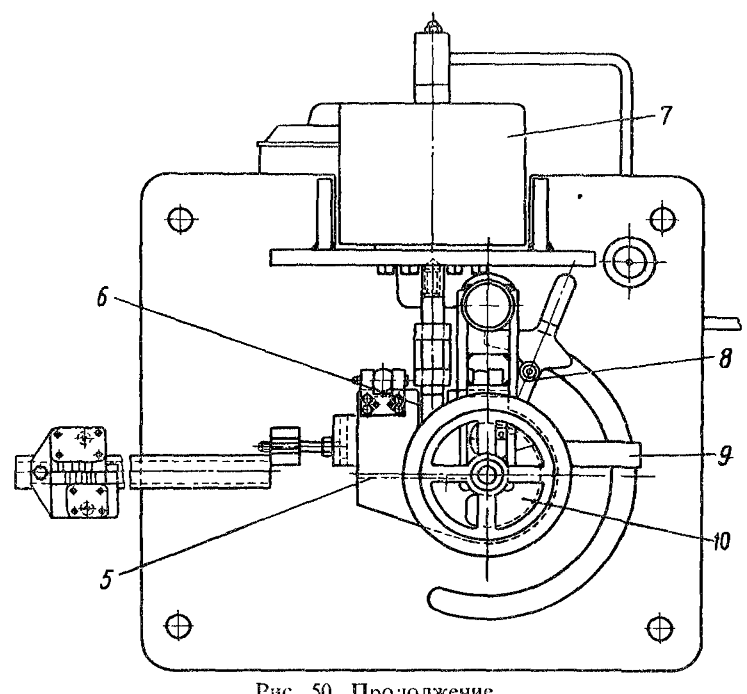


Рис. 50. Продолжение

изгиба провода находятся между верхней и нижней плитой, то головки изгибаются строго на ребро без перекоса проводов. Пакет изогнутых проводов – заготовка катушки из одновитковых секций – показан на рис. 51.

Лобовые части секций изгибаются и формуются на других гибочных приспособлениях (рис. 52). Выгибают одновременно провода всех секций, образующих одну катушку, так же, как и при изгибании головок. Приспособление имеет цилиндрическую поверхность *1* с радиусом, равным радиусу якоря. Сменные планки *2*, *4*, *5*, *8* и *9* подбирают по размерам пазовой и лобовых частей секции. Головки всех секций устанавливаются в паз между планками *4* и *5* и зажимаются эксцентриками *6* и *7*. Ударами деревянного молотка формуется лобовая часть – участок *AB* Весь пакет проводов вручную изгибается и устанавливается вдоль планки *8* – участок *BC* (пазовая часть). Далее отгибается вторая лобовая часть – участок *CD*. Она формуется и зажимается одновременно с пазовой частью при повороте эксцентрика *3*. Последними отгибаются и выравниваются концы секций – участок *DE* пакета проводов. На описанном приспособлении можно изгибать и формовать верхние стержни обмотки. Нижние стержни или вторую половину цельных одновитковых секций изгибают и формуют на другом таком же приспособлении с несколько измененными размерами лобовых частей

Для изготовления стержневых обмоток применяют прямоугольный изолированный медный провод ПСД (при классах нагревостойкости изоляции В и F) или ПСДК (при классе нагревостойкости Н). Секции, находящиеся в середине катушки, для повышения надежности изоляции через одну дополнительно изолируют одним слоем стеклянной непрерывной изоляции вполнахлеста

Пазовая изоляция выполняется либо мягкой гильзой из гибкого миканита, либо непрерывной изоляцией из стеклослюдопластовой ленты или полиамидной пленки, намотанной вполнахлеста в несколько слоев Изоляция лобовых

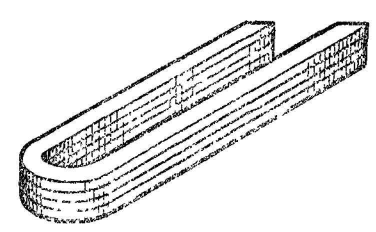


Рис 51 Заготовки секции стержневой обмотки якоря

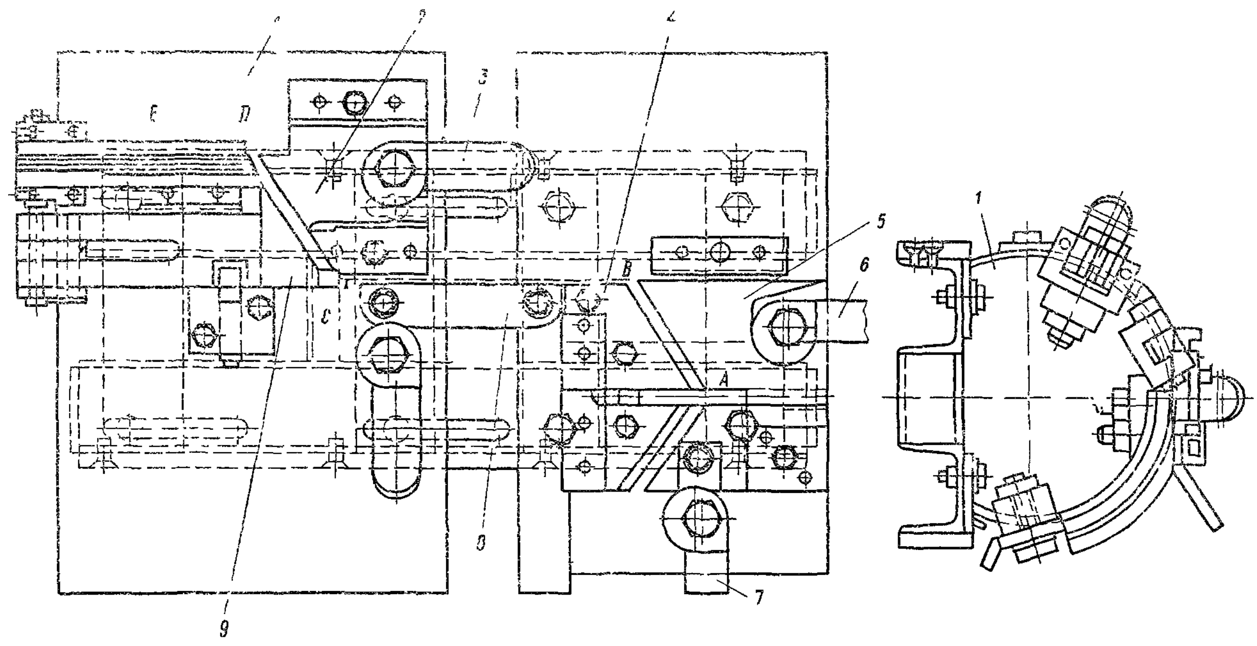


Рис. 52. Гибочное приспособление для выгибания и формовки лобовых частей волновой стержневой обмотки якоря

частей всегда непрерывная из ленточного материала соответствующего класса изоляции.

В якорях некоторых машин высота проводников в пазу по расчету должна быть большой. Ток в обмотке якоря переменный и при большой высоте проводников в них проявится эффект вытеснения тока, что приведет к увеличению потерь в обмотке. Чтобы этого не произошло, в тех случаях, когда высота проводников превышает определенную для данной частоты тока якоря критическую высоту, *проводники* разделяют по высоте на два, и каждую пару проводников в лобовых частях соединяют параллельно. В этом случае технологический процесс изготовления стержневой обмотки усложняется, так как в гибочные приспособления необходимо закладывать одновременно все проводники, образующие секцию или стержень обмотки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 В каких машинах применяют стержневые обмотки?

2. Почему стержни статорной обмотки крупных машин делают из большого числа изолированных элементарных проводников?

3. Зачем делают транспозицию (перестановку) элементарных проводников в стержне?

4. На каком приспособлении изгибают элементарные проводники стержневых обмоток статора?

5 Опишите последовательность плетения стержня из элементарных проводников

6. В каких турбогенераторах часть элементарных проводников в стержне делают из полой меди?

7. Опишите работу изолировочного станка ЛУС-6.

8. Как изгибают стержни фазного ротора асинхронного двигателя на приспособлении с пневматическим приводом?

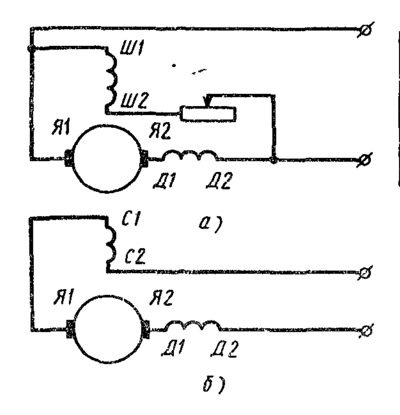
9. Опишите работу на гибочных приспособлениях для изготовления стержневой обмотки якоря.

ГЛАВА VII
КАТУШКИ ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

§ 19. ВИДЫ ПОЛЮСНЫХ КАТУШЕК

Обмотки возбуждения состоят из отдельных катушек, насаженных на сердечники полюсов. Такие катушки называются полюсными. В синхронных машинах они располагаются на сердечниках полюсов ротора, в машинах постоянного тока — на сердечниках главных и дополнительных полюсов, укрепленных на неподвижной станине. Конструкция

катушек полюсов синхронных машин зависит только от их мощности. В машинах малой мощности они наматываются из изолированного круглого провода, в машинах большей мощности — из прямоугольного изолированного провода и в крупных синхронных машинах — из неизолированной шинной меди. В машинах постоянного тока конструкция полюсных катушек зависит от их назначения (катушки главных или дополнительных полюсов), от мощности машины и от схемы ее возбуждения. На рис. 53 показаны основные схемы соединения обмотки возбуждения: параллельная, последовательная, смешанная. Обмотка дополнительных полюсов соединяется всегда последовательно с якорем. По этой обмотке протекает полный ток машины. Поэтому катушки дополнительных полюсов наматывают из проводов большого сечения: в машинах средней мощности — из прямоугольного изолированного провода и в более крупных машинах — из неизолированной шинной меди. В схемах машин с параллельным возбуждением (рис. 53,*а*) обмотка возбуждения, расположенная на главных полюсах, включена параллельно с якорем. Катушки главных полюсов, чтобы снизить ток возбуждения, делают с большим числом витков из круглых или в машинах большой мощности из прямоугольных проводов небольшого сечения. В машинах с последовательным возбуждением (рис. 53,*б*) обмотка главных полюсов соединяется с якорем последовательно. Катушки этой обмотки, так же как и катушки дополнительных полюсов, в большинстве случаев наматывают из прямоугольного изолированного провода или из шинной меди. Лишь в машинах малой мощности катушки обмотки последовательного возбуждения наматываются из круглого провода, площадь



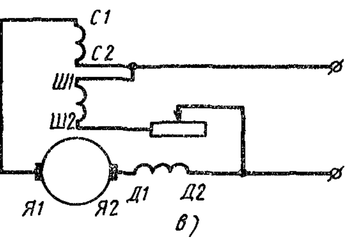


Рис 53. Схемы соединения обмоток возбуждения машин постоянного тока:

а — параллельная, *б* — последовательная, *в* — смешанная

поперечного сечения которого должна быть рассчитана на полный ток якоря.

В машинах со смешанным возбуждением (рис. 53, в) на главных полюсах располагаются катушки и параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Они наматываются раздельно: катушки параллельного возбуждения – из круглого или прямоугольного провода малого сечения, а катушки последовательного возбуждения – из круглых или прямоугольных проводов большого сечения или из шинной меди.

Несмотря на то что полюсные катушки и по своей конструкции и по назначению значительно отличаются друг от друга, по технологии изготовления их можно объединить в три группы: многослойные катушки из круглого или прямоугольного изолированного провода, катушки из неизолированной шинной меди, намотанной плашмя, и из неизолированной шинной меди, намотанной на ребро. Способ изгиба медной шины определяет конструкцию катушек и технологию их изготовления.

§ 20. КАТУШКИ ИЗ ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОВОДА

Многовитковые полюсные катушки из изолированного провода имеют два конструктивных исполнения: каркасные и бескаркасные. Каркасные катушки наматываются на каркас из тонкой листовой стали, размер внутреннего окна которого точно соответствует размеру сердечника полюса. Катушки не снимаются с каркаса во время всех дальнейших операций – пропитки, сушки, изолировки – и вместе с ним насаживаются на сердечники полюсов. Такая конструкция несколько упрощает технологию изготовления катушек и сохраняет целостность изоляции витков, но во время пропитки каркас затрудняет проникновение лака внутрь многослойной катушки. Между слоями и между отдельными проводниками сохраняются воздушные включения и ухудшается отвод тепла от проводников, находящихся во внутренних слоях.

В современном электромашиностроении большей частью применяют бескаркасную намотку катушек. Провод наматывают правильными рядами на деревянные или алюминиевые шаблоны (рис. 54) с размерами, точно соответствующими сердечникам полюсов машины с учетом изоляции катушек. Вывод от начала катушки выполняют путем припаивания к началу первого витка медной ленты, которую, после того как катушка снята с шаблона, огибают вокруг катушки,

подкладывая под нее изоляцию. В катушках, намотанных круглым проводом малого сечения, к началу первого витка припаивают гибкий изолированный провод, который также выводится за корпусную изоляцию после намотки катушки

Намотка многовитковых катушек на большинстве заводов механизирована (рис. 55, *а*). Для обеспечения правильной намотки витков станок имеет механизм раскладки провода. Станок работает следующим образом (рис. 55, *б*). От приводного двигателя *1* вращение передается на вал шпинделя станка *14* через клиноременную передачу *4* и коробку скоростей *8*. Изменение частоты вращения шпинделя производится поворотом рукояток *А* и *В*, которые перемещают блоки шестерен *7* и *10* коробки скоростей, сидящие на скользящих шпонках. На валу шпинделя установлена муфта сцепления *3* При ее отключении рукояткой *Б* шпиндель можно поворачивать вручную, что необходимо в начале и в конце намотки для закрепления первых и последних витков и установки выводных концов катушки. Со шпинделем станка жестко сцеплен механизм счетчика оборотов *16*, который отсчитывает обороты при механическом и ручном проворачивании шпинделя.

Механизм раскладчика приводится в действие от вала *6* коробки скоростей станка и состоит из каретки *11*, сцепленной гайкой *12* с ходовым винтом *13*, и двух муфт: автоматического *9* и ручного *15* реверсирования, обеспечивающих изменение вращения ходового вала и возвратно-поступательное движение каретки. Муфта ручного реверсирования приводится в действие рукояткой *Г*. Подача механизма раскладки регулируется установкой различных наборов шестерен *2* и коробкой передач *5* таким образом, чтобы за один оборот шпинделя станка каретка подавалась на шаг, равный диаметру изолированного провода. В расчетах учитывается допуск на толщину изоляции и плотность укладки провода, равный примерно 4% для круглых и 7% для прямоугольных проводов. Двусторонняя муфта *15* связана с пусковой педалью *Д*; когда педаль находится в исходном положении (вверху), муфта

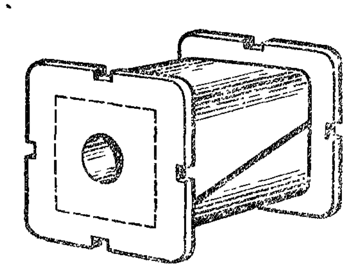


Рис 54 Шаблон для намотки катушек полюсов

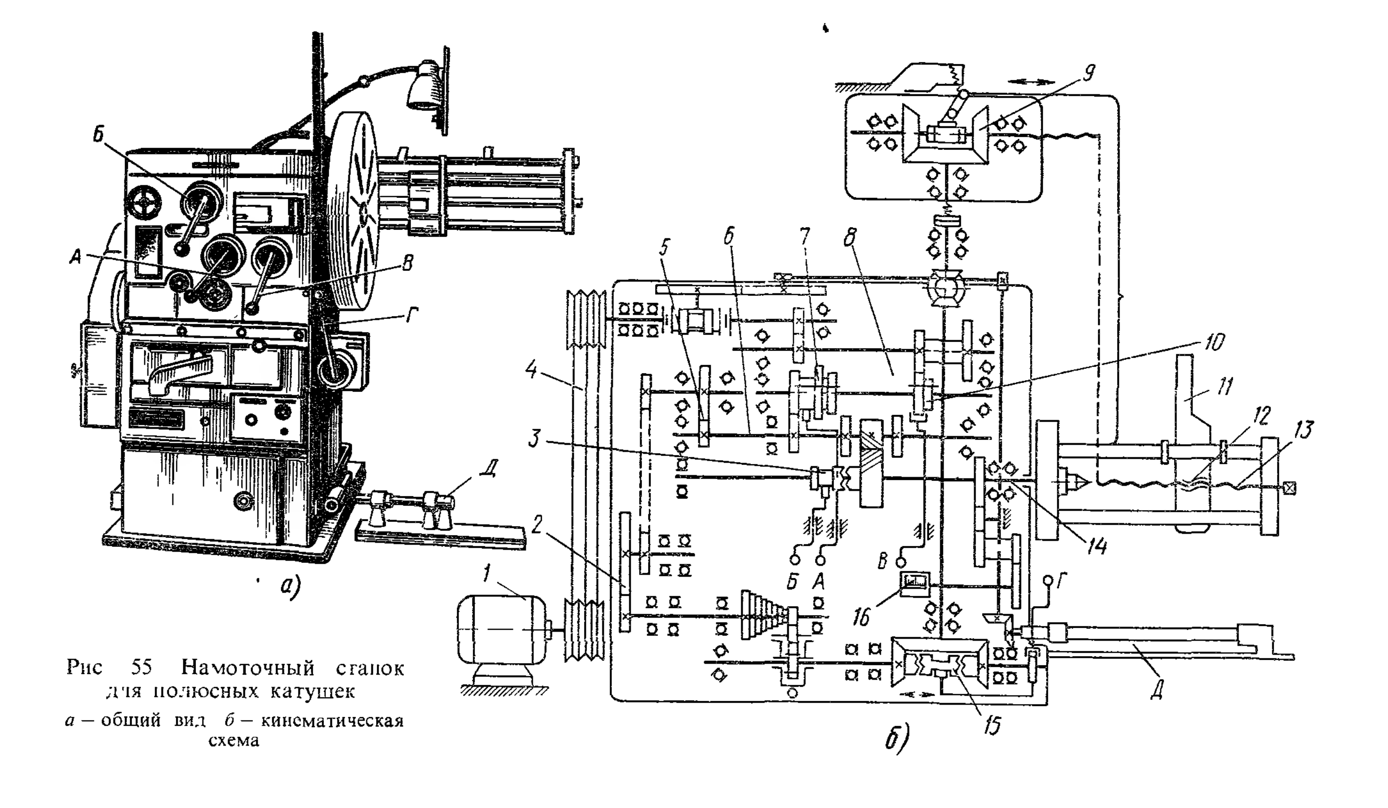


Рис 55 Намоточный станок для полюсных катушек

а – общий вид *б* – кинематическая схема

отсоединяет двигатель станка и тормозит механизм шпинделя и механизм раскладки, при нажатии педали все механизмы станка включаются в работу

Полюсные многовитковые катушки часто имеют ступенчатую форму число витков в верхних слоях катушки меньше, чем в нижних Чтобы витки плотно держались в неполных слоях во время намотки, на место недостающих витков в слое устанавливают закладные кольца из изоляционного материала (рис 56) Толщина колец делается равной высоте ступени, а ширина — разности полной ширины катушки и ширины меньшей ступени Реверсирование каретки намоточного станка во время намотки узкой ступени осуществляют вручную без переналадки механизма раскладки, так как число витков в малых ступенях катушек много меньше, чем в основной их части

Катушки, снятые с шаблона, подготовляют к пропитке Выравнивают внутреннюю поверхность, которой катушки будут прилегать к сердечнику полюса, изолируют и закрепляют выводные концы, неровности вокруг выводов заполняют изоляционной замазкой Витки катушки до пропитки плохо скреплены друг с другом и могут сползти со своих мест, особенно по краям катушки Поэтому до пропитки на катушку накладывают часть корпусной изоляции, так называемой стягивающий слой Остальную корпусную изоляцию накладывают после первой пропитки, после чего катушку пропитывают вторично, чтобы лак заполнил промежутки между слоями корпусной изоляции Если всю корпусную изоляцию наложить до первой пропитки, то она затруднит проникновение лака к внутренним виткам обмотки и качество пропитки ухудшится В некоторых машинах катушки пропитывают не снимая с шаблона В этих случаях используют шаблоны с отверстиями в боковых планках для лучшего проникновения лака к виткам катушки Стягивающего слоя корпусной изоляции на такие катушки не накладывают

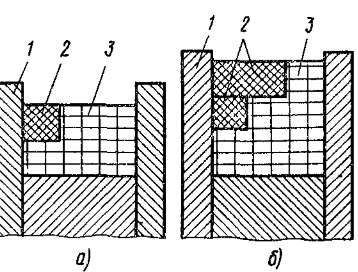


Рис 56 Установка закладных колец для намотки ступенчатых катушек

а — с одной ступенью, *б* — с двумя ступенями *1* — шаблон, *2* — закладные кольца *3* — проводники обмотки

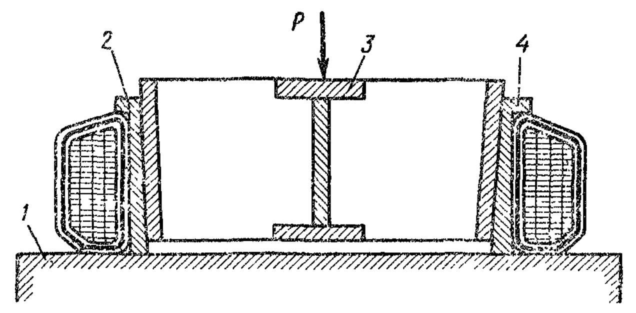


Рис 57 Пресс для правки внутреннего окна катушки возбуждения

Корпусную изоляцию на пропитанные катушки накладывают либо вручную, либо с помощью изолировочных головок, конструкция которых описана в § 6.

Во время изолировки, пропитки и сушки катушки ее внутреннее отверстие может несколько изменить приданные ему на шаблоне форму и размеры. Поэтому после окончательной пропитки катушку в горячем состоянии, пока еще лак или компаунд окончательно не затвердел, правят на пневматических прессах (рис. 57). Катушку укрепляют на столе *1*, в ее внутреннее отверстие устанавливают вкладыши *2* и *4*, между которыми с помощью пневматического пресса вдвигают оправку *3* до упора ее в стол.

Катушки полюсов в машинах постоянного тока малой мощности с небольшим диаметром станины делают изогнутыми, чтобы уменьшить высоту полюсов (рис 58, *а*). Такие катушки наматывают на обычный прямой шаблон, а выгибают одновременно с правкой размеров внутреннего окна в гибочных приспособлениях (рис. 58, *б*).

Далее очищают выводные концы катушки от лака, оставшегося после пропитки, и маркируют буквами Н и К — начало и конец намотки, которые пишут острой эмалью около каждого вывода.

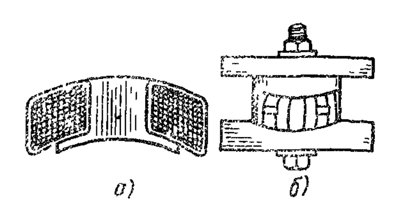


Рис 58 Изогнутая катушка машины постоянного тока малой мощности (*а*) и гибочный шаблон (*б*)

В готовой катушке контролируют размеры, измеряют сопротивление провода и проверяют отсутствие витковых замыканий.

§ 21. КАТУШКИ ИЗ НЕИЗОЛИРОВАННОЙ ШИННОЙ МЕДИ, НАМОТАННОЙ ПЛАШМЯ

Намотку катушек из шинной меди плашмя производят на шаблонах, укрепленных на шпинделе намоточных станков. Шина сматывается с бухты. Чтобы ее выправить перед намоткой и плотно уложить в шаблон, станок должен развивать большое усилие. В то же время частота вращения шпинделя должна быть малая, чтобы обмотчик имел возможность подправить на шаблоне изгибы шины в процессе намотки каждого витка. Поэтому в приводах намоточных станков устанавливаются мощные понижающие редукторы. В качестве витковой изоляции для катушек, намотанных плашмя, применяют асбестовую ленту толщиной 0,2—0,3 мм и шириной на 2—3 мм больше, чем ширина медной шины. В намоточном станке (рис. 59)

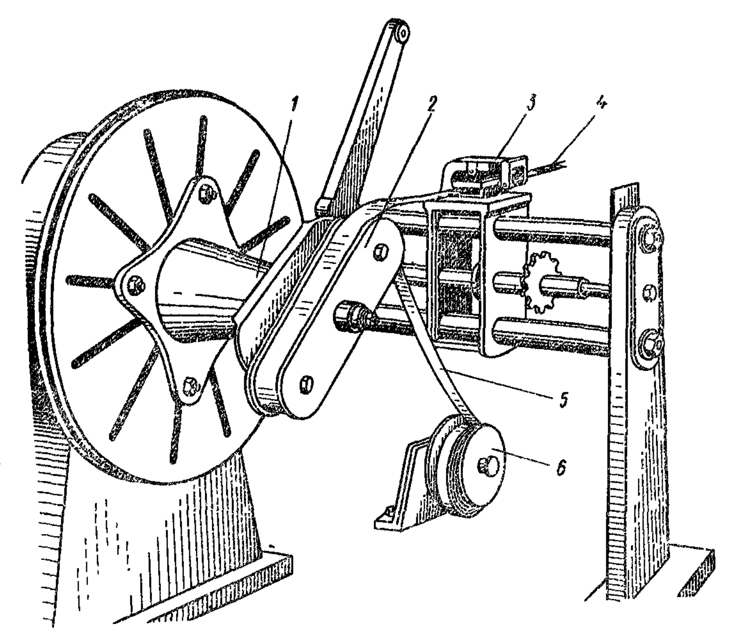
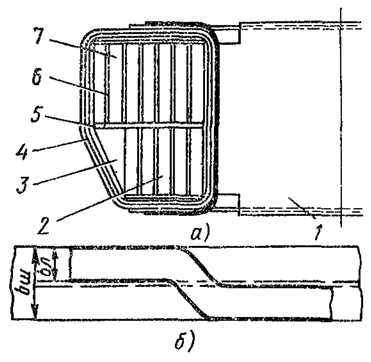


Рис. 59. Станок для намотки катушек из шинной меди плашмя

шаблон *2* укреплен на шпинделе *1*. Медная шина *4* подается на шаблон через зажимное устройство *3*. Витковая изоляция *5* — асбестовая лента — сматывается с рулона *6* и укладывается одновременно с намоткой витков меди.

Катушки из намотанной плашмя шинной меди могут быть однорядными или двухрядными. Намотка двухрядных катушек (рис. 60,*а*) несколько сложнее, чем однорядных. Их наматывают на шаблон, имеющий двойную ширину — два ручья. Чтобы оба выводных конца катушки располагались с ее верхней стороны, двухрядные катушки наматывают в два приема. Перед намоткой вручную отматывают с барабана 1—2 м шины и на расстоянии примерно 500 мм от ее начала выгибают на ребро, как показано на рис. 60,*б*. Изогнутую шину закрепляют в шаблоне так, чтобы одна ее часть прилегала к одной боковой стороне шаблона, а другая — к другой, т. е. чтобы изогнутые части располагались в разных ручьях шаблона. В один ручей наматывают первый слой катушки, одновременно устанавливая витковую изоляцию. Под предпоследний виток закладывают скобочку из жести, которая служит для закрепления крайнего витка. После того как намотан последний виток, концы скобочки загибаются (рис. 60,*в*) и припаиваются к наружной поверхности последнего витка. Выводной конец припаивается к последнему витку в месте, отстоящем примерно на пол-оборота от его конца. Вывод катушки обычно делают из гибкого кабеля и припаивают к шине твердым медно-фосфористым припоем. Закрепив конец витка, шину обрезают или обрубают пневматическим зубилом и приступают к намотке второго слоя. Для этого к началу шины, выведенному перед намоткой в другой ручей шаблона, приваривают встык конец шины от бухты. Место сварки зачищают, устанавливают изоляционную прокладку и, вращая шпиндель в том же направлении, наматывают нужное число витков в другой ручей шаблона. Выводной конец и последний виток слоя закрепляется точно так же, как и в первом слое.

Наложение корпусной изоляции и пропитка катушек, намотанных из неизолированной шинной меди плашмя, производится так же, как и катушек из изолированного прямоугольного провода. Правку внутренних размеров катушки выполняют два раза: после первой и после второй пропиток. Это вызвано тем, что первые витки катушки наматываются с меньшим натяжением, чем последующие. При нагреве во время пропитки и сушки происходит



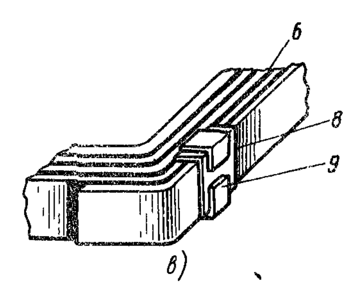


Рис 60 Двухрядные катушки из шинной меди, намотанные плашмя

а — положение катушки на сердечнике полюса, *б* — изгиб шины в месте перехода из одного ряда в другой, *в* — крепление последнего витка, *1* — сердечник полюса, *2* — витки неполного слоя, *3* — изоляционная замазка, *4* — корпусная изоляция катушки, *5* — прокладка между слоями, *6* — изоляция между витками, *7* — витки полного слоя, *8* — изоляция под скобочкой, *9* — крепежная скобочка, $b_л$ — ширина медной шины, $b_ш$ — ширина желоба шаблона

перераспределение напряжений в меди, вызывающее некоторую деформацию витков и уменьшение внутренних размеров катушки. Для восстановления нужных размеров катушку правят первый раз в горячем состоянии после первой пропитки, второй раз — после наложения корпусной изоляции и окончательной пропитки и сушки Размеры вкладышей для первой и второй правки должны быть различными с учетом толщины корпусной изоляции.

§ 22. КАТУШКИ ИЗ ШИННОЙ МЕДИ, НАМОТАННОЙ НА РЕБРО

Намотка шинных катушек на ребро — более сложная операция, чем намотка плашмя, особенно при больших отношениях ширины шинной меди к ее толщине. Для намотки катушек создано несколько типов намоточных станков, позволяющих наматывать шинные катушки с одним или двумя радиусами изгибов (рис. 61, *а*, *б*)

Катушки с одним радиусом изгиба лобовой части витков устанавливают на узких полюсных сердечниках — дополнительных полюсах и в большинстве полюсов роторов синхронных машин, катушки с двумя радиусами изгибов — на широких сердечниках.

На рис. 62, *а* дана кинематическая схема полуавтоматического намоточного станка ПНК-2 для намотки полюсных

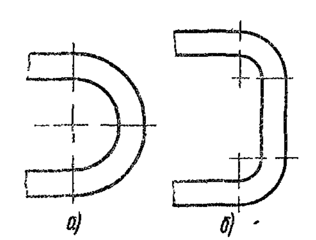


Рис 61. Лобовая часть катушки возбуждения

а — однорадиусной, *б* — двух радиусной

Рис 62 Намоточный станок ПНК-2

а — кинематическая схема, *б* — схема движения стола и планшайбы станка

катушек на ребро с одним радиусом изгиба. На массивной станине станка укреплена поворотная планшайба 7 с двигающимся по ней столом 4 с зубчатой рейкой Поворот

планшайбы и движение стола происходят поочередно: при повороте планшайбы стол неподвижен, при движении стола неподвижна планшайба. Приводной двигатель *11* станка соединен клиноременной передачей с распределительным механизмом, состоящим из нескольких магнитных муфт и зубчатых зацеплений. Стол движется при включении муфты *10* через систему зубчатых зацеплений, приводящую во вращение зубчатое колесо *6*, сцепленное с рейкой стола *5*. В зависимости от положения зубчатых колес реверсивной муфты *9* стол движется в одном или в другом направлении относительно планшайбы. Во время движения стола планшайба удерживается в неподвижном состоянии магнитным тормозом *3*. Поворот планшайбы происходит при включении электромагнитной муфты *2* и одновременном выключении тормоза. В это время стол *4* закреплен неподвижно в одном из своих крайних положений относительно планшайбы фиксирующим болтом *8*.

Процесс формирования витков катушки пояснен на рис. 62, *б*. Положение *I* – планшайба *7* неподвижна; стол движется от одного крайнего положения к другому, формируя длинную сторону витка. Положение *II* – стол фиксируется в неподвижном состоянии относительно планшайбы; планшайба поворачивается на 180° вместе со столом, формируя изгиб витка. Положение *III* – планшайба неподвижна, стол движется в другую сторону относительно планшайбы, формируя другую длинную сторону витка. Положение *IV* – стол неподвижен, планшайба поворачивается на 180°, формируя второй изгиб витка, и возвращается в положение *I*. Далее процесс намотки повторяется. Все переключения производятся автоматически конечными выключателями, установленными на станине и планшайбе станка. Медная шина во время намотки прижимается к поверхности планшайбы с помощью прижимного устройства *1*, давление которого регулируется грузом *12*.

На станке наматывается непрерывная спираль из шинной меди с заданными размерами витков. Катушки получают, разрезая спираль на части с нужным числом витков.

Аналогично работают и другие станки для намотки полюсных катушек из шинной меди на ребро. Принцип работы их также построен на сложном движении шаблона, обеспечивающем равномерное натяжение шины во время формирования витков катушки.

Намотка шинной меди на ребро всегда вызывает дефор-

мацию шины: на внутреннем радиусе изгиба шина утолщается, на внешнем несколько растягивается, и витки катушки непосредственно после намотки не могут плотно прилегать друг к другу. Для придания виткам первоначальных размеров катушку опрессовывают. До опрессовки, чтобы снять остаточные напряжения, появившиеся при изгибе, медь витков отжигают. Для этого катушку помещают в электропечь, нагревают до 600–620 °С и выдерживают при этой температуре в течение 30–40 мин в зависимости от сечения медной шины. После этого охлаждают в ванне с водой и на несколько минут помещают в ванну с 5%-ным раствором серной кислоты для удаления с поверхности витков образовавшейся при нагреве оксидной пленки. Кислоту смывают в ванне проточной водой, катушку сушат и передают на опрессовку.

Первая опрессовка имеет своей целью удалить утолщения, образовавшиеся во время изгиба шины на ребро. Для этого между витками в местах закруглений прокладывают стальные закаленные пластины и сжимают витки прессом до их полного прилегания торцевыми поверхностями друг к другу.

Во время второй опрессовки правятся внутренние и внешние размеры катушки. Для этой цели применяют разборный шаблон (рис. 63), состоящий из двух щек *1* и *5*, трехклинового сердечника *3* и двух болтов *2* и *4* с шайбами и гайками. Размеры сердечника и щек соответствуют расчетным размерам катушки: ширина и длина сердечника в собранном виде – размерам окна катушки, высота его деталей – высоте, а ширина щек – ширине катушки. Опрессовку проводят в два приема. Сначала выправляются внутренние размеры и высота катушки. Катушку устанавливают на столе пресса на нижнюю щеку шаблона, вкладывают два боковых клина сердечника, устанавливают верхнюю

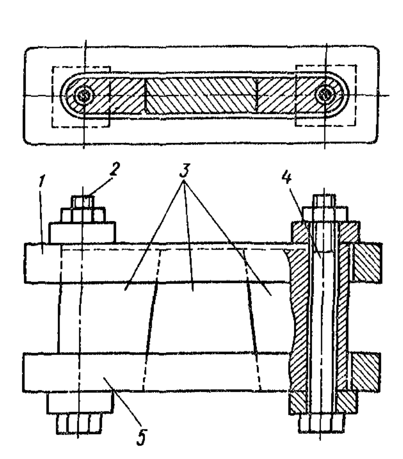


Рис. 63. Шаблон для правки и опрессовки катушек, намотанных из шинной меди на ребро

щеку и прессом вдавливают средний клин сердечника. Пока средний клин сердечника не сравнялся с верхней щекой, пресс давит только на клин. После этого давление пресса распространяется также и на верхнюю щеку, которая осаживается вместе с клином до упора пресса в крайние части сердечника. Таким образом правятся размеры внутреннего окна катушки и опрессовываются ее витки до расчетной высоты. После этого давление снимают, шаблон поворачивают набок, устанавливают болты, стягивают катушку между двумя щеками и давлением пресса на боковую поверхность правят наружные размеры катушки. Ограничением хода пресса при этом служит размер боковых щек шаблона.

После опрессовки витки катушки растягивают гармошкой и устанавливают витковую изоляцию – асбестовую бумагу, нарезанную по конфигурации витков с некоторым запасом. Витки катушки зажимают, излишки изоляции с внутренней и наружной стороны срезают ножом и катушки в местах закруглений обтягивают лавсановой лентой для предохранения витковой изоляции от возможного сдвига.

Перед пропиткой катушки зажимают струбцинами и сушат в печи при 110 – 130°C После этого струбцины ослабляют и катушки опускают в пропиточную ванну с лаком. Перед сушкой в печи после пропитки струбцины вновь зажимают, а, спустя примерно половину времени сушки, катушки вынимают из печи и подтягивают струбцины. После окончательной сушки на катушки накладывают корпусную изоляцию и пропитывают второй раз.

§ 23. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАТУШЕК ВОЗБУЖДЕНИЯ КРУПНЫХ СИНХРОННЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Полюсные катушки роторов крупных синхронных гидрогенераторов изготовляют из медных неизолированных шин гибкой на ребро. Технология их изготовления несколько отличается от рассмотренной в § 22 из-за большой массы меди каждой катушки и ее размеров. Масса катушки полюса крупного гидрогенератора достигает 500 – 600 кг, а масса одной бухты шинной меди, поставляемой заводу, обычно не превышает 60 – 85 кг, поэтому каждую катушку наматывают из нескольких бухт, сваривая концы шин в торец друг с другом Катушки наматываются из медных шин шириной до 80 мм при толщине 2 – 15 мм. Изгиб таких

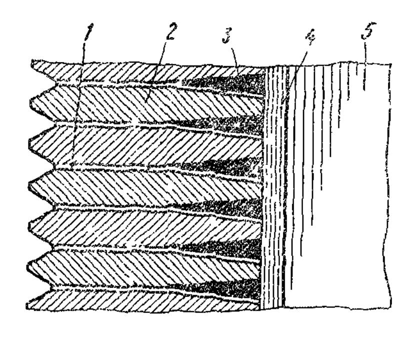


Рис 64 Катушки из шинной меди обмоток возбуждения гидрогенераторов

1 – изоляция между витками, *2* – витки катушки из шинной меди специального профиля, *3* – полоски асбеста для заполнения промежутков между шинами, *4* – изоляция катушки от корпуса, *5* – сердечник полюса

шин на ребро вызывает большое утолщение внутренних участков, которое не удается выровнять прессованием, как в катушках меньших размеров. Чтобы избежать утолщения при изгибе витков, катушки крупных гидрогенераторов наматывают не из прямоугольных шин, а из шин специального профиля Поперечное сечение таких шин имеет вид, показанный на рис. 64 Боковые поверхности шины параллельны лишь на половине ее ширины. Сторона, обращенная к внутреннему радиусу изгиба, постепенно утоньшается с углом скоса в несколько градусов (приблизительно 2 - 4°), что компенсирует ее утолщение при изгибе. Внешняя сторона витков скошена «топориком» (см. рис 64). Это увеличивает поверхность соприкосновения витков катушки с охлаждающим воздухом, так как с наружной стороны катушки гидрогенераторов не изолируются. Свободное пространство между витками в частях, прилегающих к сердечнику полюса, после сборки катушки заполняется асбестовой бумагой и клеящим лаком.

Катушки гидрогенераторов наматывают на станке (рис 65). От приводного двигателя *1* через плоскоременную передачу и систему зубчатых передач получает вращение шестерня *2*, закрепленная на вертикальном валу. С шестерней сцеплено зубчатое фигурное основание оправки *3*. Движение оправки по плоскости стола ограничивается вертикальным пальцем *4*, проходящим через овальный паз *5* оправки. Шестерня *2* сообщает оправке возвратно-поступательное и вращательное движение Сверху оправки укреплены стальные цилиндры – штыри *6*, формирующие закругления витков катушки. После намотки нужного числа витков шина приподнимается и обрезается пневматическими ножницами *7*. После намотки катушки отжигают, нагревая витки током, чтобы не образовалась окалина. Далее следуют операции

рихтовки витков, опрессовки и правки размеров катушки, аналогичные рассмотренным в § 22. Катушки гидрогенераторов не пропитывают. Их витковая изоляция — асбестовая бумага толщиной 0,3—0,5 мм — нарезается по форме витков и приклеивается к широкой поверхности витков клеящим лаком. Катушки для этого подвешивают на стеллажах, раздвигая витки. На более тонкие прямолинейные участки витков, обращенные к сердечнику полюса, наклеивают дополнительные полоски асбестовой бумаги, чтобы компенсировать утоньшение меди в этих местах (см. рис. 64). Межвитковую изоляцию запекают, предварительно отрихтовав и выровняв нагретую катушку. Запечку производят под давлением при температуре, зависящей от состава

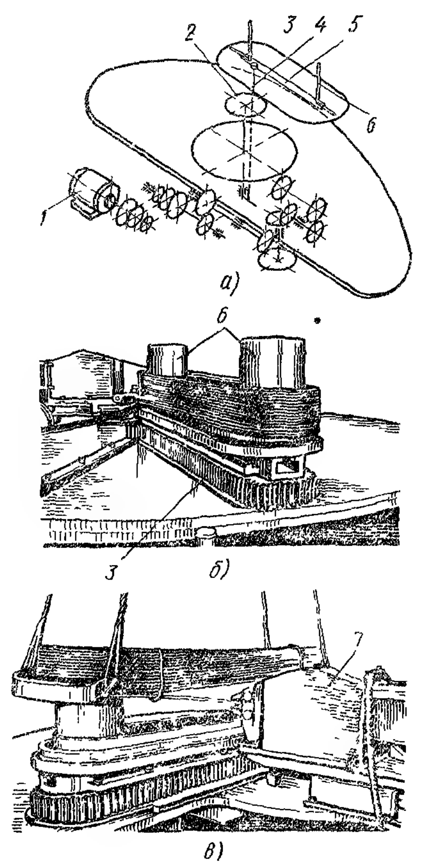


Рис. 65. Стапок для намотки катушек возбуждения гидрогенераторов:

а — принципиальная схема станка, *б* — намотка витков, *в* — отрезание витков пневматическими ножницами

лака и размеров катушки. Охлажденную после запечки катушку очищают от остатков клеящего лака, подрезают излишки витковой асбестовой изоляции и лакируют всю ее поверхность. Контроль готовых катушек заключается в проверке их размеров и испытании витковой изоляции, которые проводят, устанавливая катушку под пресс в холодном состоянии, десятикратным по сравнению с номинальным испытательным напряжением.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Как может быть соединена обмотка возбуждения машины постоянного тока с обмоткой якоря?

2 Как работает намоточный станок для полюсных катушек?

3 Для чего нужны закладные кольца при намотке ступенчатых катушек?

4 Как правят внутренние размеры многовитковых катушек?

5 Опишите работу станка для намотки катушек из шинной меди плашмя

6 Как закрепляются последние витки катушек намотанных плашмя?

7 Полюсные катушки каких машин наматывают из шинной меди на ребро?

8 Опишите работу намоточного станка для намотки катушек из шинной меди на ребро

9 Какого профиля медные шины используют для намотки полюсных катушек крупных гидрогенераторов?

Глава VIII
ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 24 ИЗОБРАЖЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК

Схематический чертеж, на котором изображены соединения катушек обмотки между собой, называют схемой обмотки При вычерчивании схем принимается ряд условностей Чертеж выполняют без соблюдения масштаба, поэтому он не отражает действительных размеров катушек

Существует несколько способов изображения схем, из которых наибольшее распространение получили так называемые развернутые схемы и торцевые схемы Торцевая схема представляет собой как бы вид с торца на обмотанный статор (рис 66) На ней удобно показывать соединение катушек в лобовых частях, но имеется мало места для изображения соединений между катушками и катушечными группами Такую

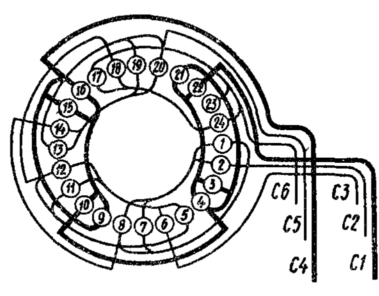


Рис 66 Торцевая схема обмотки

схему для сложных обмоток трудно читать Развернутая схема представляет собой как бы развертку по верхности статора или ротора с уложенной в пазы обмоткой Пазы на ней изображаются прямыми вертикальными линиями, а катушки — четырехугольниками или пятиугольниками, причем стороны катушек показывают одной линией независимо от числа витков в них На такой схеме удобно показать все соединения в обмотке, но на краях чертежа приходится делать разрыв, как при черчении развертки любой цилиндрической поверхности Пазы сердечника нумеруют, причем первый паз и направление отсчета (вправо или влево) могут быть выбраны произвольно

§ 25 СХЕМЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Чтобы лучше разобраться и понять порядок соединения схем однослойных обмоток, проделаем некоторые предварительные построения для одной из простейших однослойных обмоток — обмотки статора машины с числом пазов $Z = 24$, числом полюсов $2p = 4$, соединенной последовательно (число параллельных ветвей $a = 1$) На рис 67 *а* показаны 24 линии пазов, в середине каждой из них написан номер паза Все пазы разделены на четыре части по числу полюсных делений машины ($2p = 4$) В каждой части, т е на каждом полюсном делении машины, находится по шесть пазов При расчете обмоток длину полюсного деления машины удобнее выражать не в линейных размерах (м или мм), а числом пазовых делений, имея в виду, что одно пазовое деление равно $t_z = \frac{\pi D}{Z}$ мм, где D — внутренний диаметр статора В нашем случае полюсное деление $\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$ пазовым делениям Так как обмотка симметрична, то на каждом полюсном делении должно располагаться равное число сторон катушек всех трех фаз, т е по два паза должны быть заняты сторонами катушек каждой из фаз Число пазов на полюс и фазу такой обмотки $q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$ и число катушек, составляющих одну катушечную группу, равно 2

На рисунке выделим различными линиями пазы, в которых располагаются стороны катушек различных фаз (*A*, *B*, *C*), а на линиях пазов стрелками покажем направление

мгновенных значений тока в каждой из сторон катушек. На первом полюсном делении оно может быть выбрано произвольно, но одинаково для всех фаз. Так как полярность полюсов на соседних полюсных делениях будет обратна первому, то и направление мгновенных значений токов на них должно быть изменено на обратное во всех фазах. Таким образом, направления стрелок в пределах одного полюсного деления на всех пазовых линиях одинаковы и меняются на обратные при переходе к следующему полюсному делению

Полученное распределение токов в пазовых частях катушек характерно для всех однослойных обмоток. Их можно по-разному соединить между собой в лобовых частях. От того или иного соединения зависит схема обмотки. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные схемы однослойных обмоток.

Однослойная концентрическая обмотка. Соединив между собой попарно пазовые части катушек одной из фаз, как показано на рис 67, *б*, получим две группы катушек, состоящих каждая из двух концентрических катушек малой и симметрично охватывающей ее большой. Соединим между собой последовательно катушки в каждой группе и обе катушечные группы между собой. При таком соединении направления токов в пазовых сторонах катушек не изменятся. Начало первой катушечной группы является началом фазы обмотки, а конец второй группы — концом фазы обмотки. По установленной ГОСТом системе выводы фаз должны быть обозначены *С1* — начало и *С4* — конец фазы.

Таким образом, на рис. 67, *б* получили схему обмотки одной фазы с заданным числом пазов, полюсов и параллельных ветвей. Другие две фазы обмотки соединяются точно так же. На рис. 68 приведена полная схема однослойной концентрической обмотки с $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$. Начала фаз в трехфазной обмотке должны быть расположены на таком расстоянии друг от друга, чтобы электрический угол между ними был бы равен углу между фазами трехфазной сети или кратен ему, т е. равен 120 или $120 \cdot к$ эл град., где $к$ — любое целое число, не кратное трем. Так как электрический угол между соседними пазами статора равен $180\ 2p/Z$, то угол $120^\circ\ к$ между началами фаз обмотки образуется, если между ними будет $\frac{120 \cdot к \cdot Z}{180\ 2p} = 2q\ к$ пазов В статорах для уменьшения длины

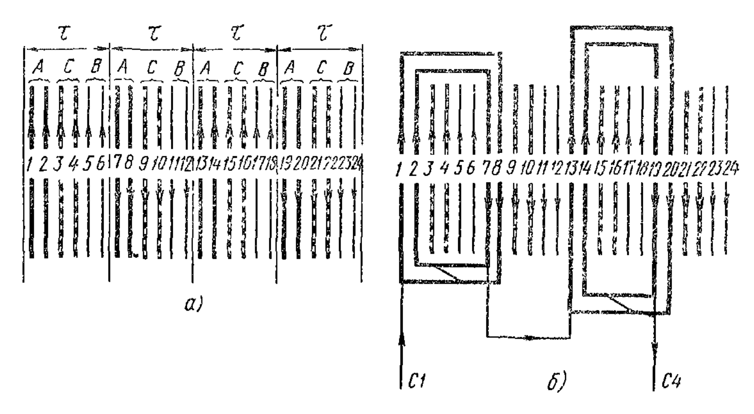


Рис 67 Построение схемы однослойной концентрической обмотки с $Z = 24$, $2p = 4$,

а — распределение пазов по фазам, б — соединение двух катушечных групп фазы

соединений между началами фаз и коробкой выводов стремятся расположить выводы фаз как можно ближе один к другому. Ближайшее возможное расстояние между выводами фаз равно $2q$ пазам Поэтому на схеме (см рис 68) начала фаз *С2* и *С3* взяты в 5-м $(1 + 4)$ пазу и в 9-м $(5 + 4)$ пазу, так как $2q = 4$

На примере схемы рис 68 рассмотрим основные характерные особенности однослойной концентрической обмотки

Число катушечных групп в каждой фазе равно числу пар полюсов обмотки В однослойной обмотке машины с $2p = 2$ в каждой фазе будет всего одна катушечная группа, если $2p = 4$ — две, если $2p = 6$, то три группы, и т д

Катушечные группы соединяются между собой согласно, т е конец первой катушечной группы каждой из фаз соединяется с началом второй, конец второй — с началом третьей катушечной группы той же фазы и т. д

Катушки, образующие

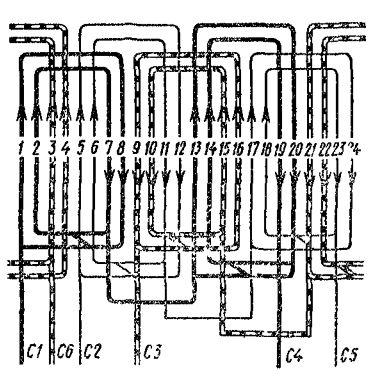


Рис 68 Схема однослойной концентрической обмотки с $Z=24$, $2p=4$

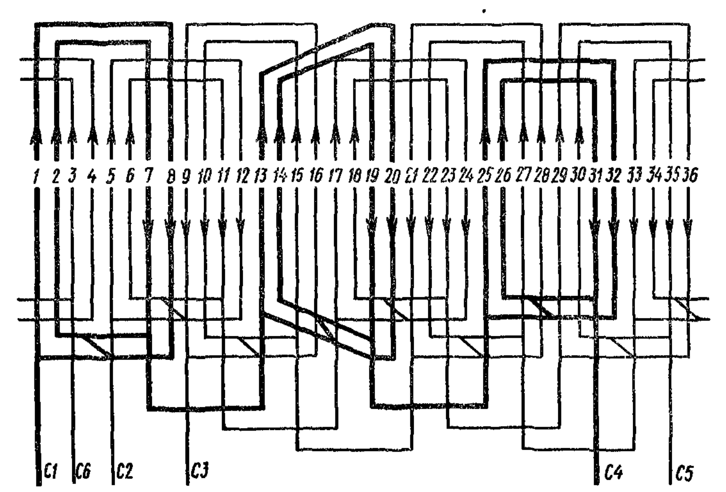


Рис. 69. Схема однослойной концентрической обмотки с «кривой» катушечной группой с $Z=36$, $2p=4$

каждую катушечную группу, имеют разную длину и ширину (шаг), так как большая катушка охватывает меньшую. Длина прямолинейной части катушек, принадлежащих соседним катушечным группам малым и большим,

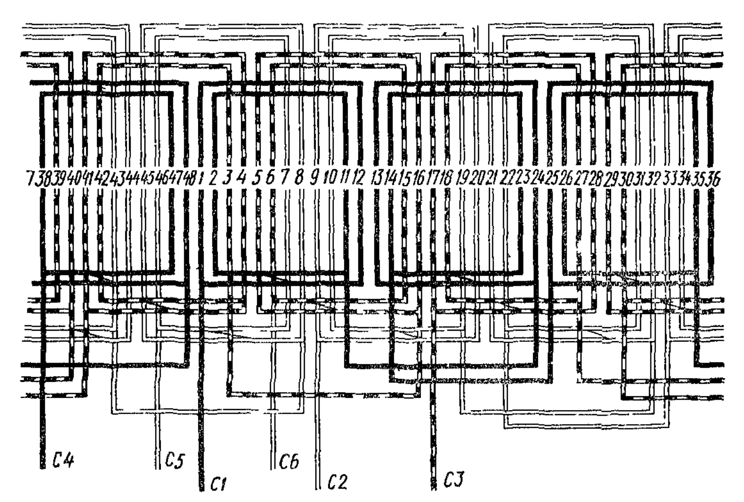


Рис. 70. Схема трехплоскостной однослойной концентрической обмотки с $Z=36$, $2p=4$

также различна Чтобы избежать перекрещивания лобовые части катушек больших и малых катушечных групп располагаются в двух разных плоскостях Поэтому такая обмотка называется двухплоскостной При четном числе пар полюсов ($2p = 2$, 4, 6 и т д) в обмотке содержится одинаковое число больших и малых катушечных групп При нечетном числе пар полюсов схема может быть составлена только при условии, что одна катушечная группа будет состоять из катушек с одной длинной и одной короткой сторонами Такая катушечная группа называется «кривой» (рис 69) При q, равном четному числу, т е при четном числе катушек в катушечной группе, установки кривой катушки можно избежать, расположив лобовые части обмотки не в двух, а в трех плоскостях К схеме трехплоскостной обмотки легко перейти от обычной двухплоскостной, изменив направление отгиба лобовых частей половины катушек каждой катушечной группы, как показано на рис 70 Полученная таким образом обмотка называется обмоткой вразвалку Сопротивления разных фаз в ней будут несколько отличаться друг от друга, так как катушки каждой из фаз имеют разные размеры

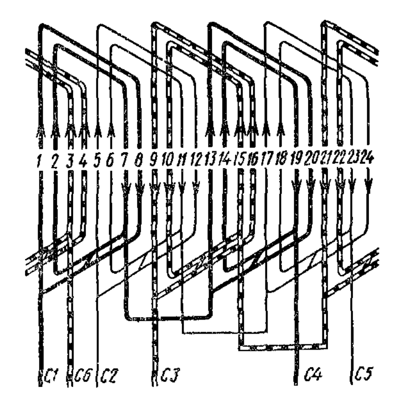


Рис 71 Схема шаблонной обмотки с $Z = 24$ $2p = 4$

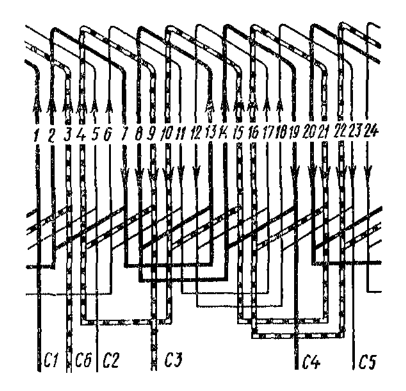


Рис 72 Схема цепной обмотки с $Z = 24$ $2p = 4$

Шаблонные однослойные обмотки. Определенное на рис 67 направление токов в пазовых частях катушек может быть получено и при другом типе соединений в лобовых частях На рис 71 приведена схема шаблонной однослойной об-

мотки. Сравнивая схемы рис. 68 и 71, видим, что они отличаются друг от друга только формой лобовых частей и конфигурацией катушек. Каждая катушка шаблонной обмотки имеет различную длину правой и левой прямолинейных частей, что позволяет сделать все катушечные группы одинаковыми и наматывать заготовки катушек на одном и том же шаблоне (отсюда название типа обмотки). Такая конструкция несколько упрощает технологию изготовления катушек, но затрудняет формовку и распределение лобовых частей обмотки

Шаблонная обмотка, как и разобранная ранее однослойная концентрическая, может быть выполнена вразвалку, т. е с изменением направления отгиба лобовых частей в половине катушек каждой катушечной группы Это еще больше уменьшает количество катушек разных размеров в обмотке

Цепные обмотки. На рис 72 приведена схема однослойной обмотки, состоящей из одинаковых катушек. Направление токов в пазовых частях катушек этой обмотки сохранилось таким же, как и в прежних схемах Изготовление всех катушек с одинаковыми размерами проще, чем концентрических, но их укладка в пазы значительно сложнее, так как возникает необходимость резких изгибов при формовке лобовых частей уложенной обмотки. Поэтому цепная обмотка встречается только в машинах старых выпусков В современных машинах она применяется редко

§ 26. УКЛАДКА ВСЫПНОЙ ОДНОСЛОЙНОЙ ОБМОТКИ

На электромашиностроительных заводах укладка однослойных всыпных обмоток в пазы статоров полностью механизирована. Для этой цели применяют высокопроизводительные обмоточные станки. Однако они требуют длительной переналадки при переходе к обмотке машин с другими размерами или обмоточными данными. Поэтому на заводах, на которых выпускают разные типоразмеры машин, но относительно небольшое количество каждого типа, обмоточные станки не устанавливают Не используют обмоточные станки и на ремонтных предприятиях, так как при ремонте помимо большого разнообразия типоразмеров машин приходится укладывать обмотку большей частью в двигатели старых серий, пазы которых не рассчитаны на механизированную укладку В этих случаях укладка всыпной однослойной

обмотки статоров машин переменного тока производится вручную

Однослойная всыпная обмотка укладывается в пазы статора до запрессовки сердечника в корпус. Во время укладки обмотчик должен иметь возможность поворачивать статор вокруг вертикальной оси различными торцами к себе и вокруг горизонтальной оси так, чтобы паз, в который укладываются проводники, находился внизу. Для этой цели рабочее место обмотчика оборудуется поворотным столом *1* с поворотными роликами *2* (рис. 73). Намотанные катушки должны быть разложены на рабочем месте в порядке их укладки в пазы. Так же должны быть разложены заготовки изоляции и инструменты обмотчика Прежде чем начать укладку, необходимо убедиться в хорошем состоянии внутренней поверхности пазов статора В пазах не должно быть какого-нибудь мусора или пыли. Стенки пазов должны быть ровными, без заусенцев на кромках листов.

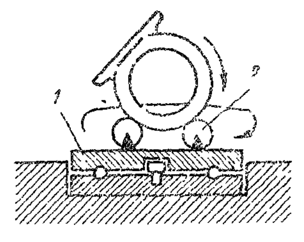


Рис 73 Поворотный стол

После проверки устанавливают пазовую изоляцию — пазовые короба, заготовки которых с нужными размерами подготовляют заранее. На большинстве заводов пазовые короба предварительно формуют — изгибают по форме паза на фальцовочных станках или прессах Это облегчает их правильную установку в пазы и повышает производительность обмотчика Торцы пазовых коробов подгибают так, чтобы

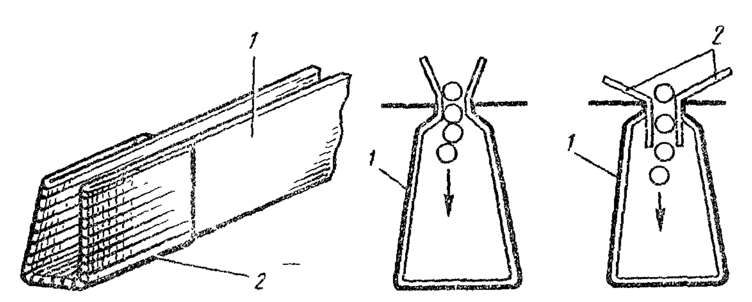


Рис 74 Манжеты на пазовых коробках

1 — пазовый короб, *2* — отогнутая манжета

Рис 75 Пазовый короб и вкладыши для укладки обмотки

1 — пазовый короб, *2* — проходные вкладыши

в местах выхода из паза образовался двойной слой пазовой изоляции – манжета (рис 74) Манжеты предохраняют торцы пазовых коробов от разрыва при укладке обмоток в пазы

Чтобы предохранить изоляцию обмоточного провода от повреждений о кромки шлица, заготовки коробов делают более широкими Их края выступают из паза и закрывают кромки шлица (рис 75) В некоторых случаях для этой цели в пазы устанавливают проходные вкладыши из электрокартона Это позволяет уменьшить ширину заготовки короба

Катушечные группы однослойных обмоток обычно наматываются на шаблонах целиком Укладку концентрических обмоток начинают с больших катушечных групп После того как уложены и закреплены в пазах все большие катушечные группы, окончательно формуют и отгибают их лобовые части и приступают к укладке малых катушечных групп Начала и концы каждой катушечной группы располагают параллельно лобовым частям и привязывают к ним не обрезая Если в чертеже предусматривается изоляция лобовых частей, то лобовые части больших катушечных групп изолируются до укладки малых После укладки и заклиновки всей обмотки и бандажировки ее лобовых частей приступают к соединению схемы Выводные концы катушечных групп отгибают в нужном направлении в соответствии со схемой обмотки и обрезают по размеру Изоляция проводников в местах соединений зачищается на длину 35—40 мм, на их концы надевают изоляционную трубку диаметром, близким к диаметру проводника, и кроме того, на один из проводников – изоляционную трубку большего диаметра Зачищенные концы проводника скручивают и сваривают с помощью угольного электрода Для этого (рис 76) зачищенную от изоляции скрутку проводов *1* зажимают сварочными клещами *2*, к которым подводится напряжение от однофазного понижающего трансформатора Второй вывод трансформатора подводят к держателю *4* угольного электрода *3* При касании электродом торцов свариваемых проводников возникает дуга и торцы проводников оплавляются В целях электрической безопасности напряжение при сварке не превышает 12 В Лишь при сварке проводников диаметром более 1 мм это напряжение может быть повышено до 24 В Сварку производят только в защитных очках После сварки оплавленное место зачищают и отгибают скрутку, прижимая ее к одному из проводов

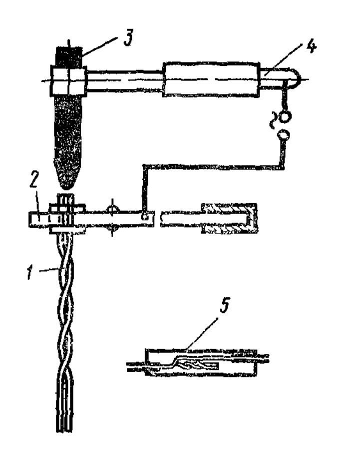


Рис 76 Установка для сварки проводов в схеме

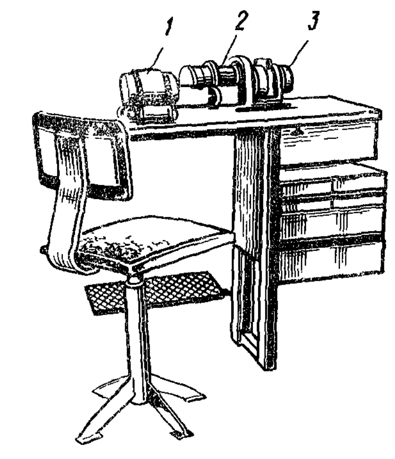


Рис 77 Установка для скрутки и обрезки проводов УС 12

На место соединения натягивают изоляционную трубку *5* большего диаметра и закрепляют ее

Для скрутки и отрезки проводов во время соединения схемы применяются также различные механические устройства Например, для скрутки и отрезки проводов при выполнении соединений в схеме обмоток статоров асинхронных двигателей серии 4А с высотой оси вращения 71 — 100 мм применяют установку УС-12 (рис 77) На столе установки смонтированы поворотное приспособление для статора *1* и механизм скручивания *2*, приводимый в действие электродвигателем *3* Статор в горизонтальном положении устанавливается на поворотное приспособление Концы соединяемых проводов вручную направляются в механизм скручивания Скручивание и обрезка проводов выполняются автоматически Установка может соединять до шести проводов в одну скрутку с общим диаметром пучка не более 3 мм Длина скрутки после обрезки — 18 мм Производительность установки *10*—*12* скруток/мин

Для соединения проводов внутри схемы помимо сварки вручную применяют установки, осуществляющие газовую сварку медных проводов ПЭВ-2 и ПЭТВ, например УС-9 На этой же установке сваривают концы фаз с многожильными выводными проводами ЛПА Скрученные провода сваривают газом — пропан-бутаном с кислородом без предварительной зачистки изоляции Производительность установки УС-9 — до 325 соединений/ч

После соединения схемы, изолировки мест соединений и установки междуфазовой изоляции в лобовых частях статор поступает на контрольные испытания прочности корпусной и витковой изоляции и проверку правильности соединения схемы.

Укладка обмотки — одна из наиболее ответственных операций при изготовлении электрической машины. Она требует большого внимания, производственных навыков и высокой квалификации обмотчиков. Малейшая небрежность, допущенная при укладке проводников в пазы, их перекрещивание или изгибы, повреждение проводниковой изоляции, резкие удары по лобовым частям при их формовке или чрезмерные усилия при уплотнении проводников в пазу, ошибочный шаг обмотки или неправильное положение лобовых частей катушек и другие ошибки обмотчика, как правило, приводят к браку в работе Часть дефектов, возникающих при обмоточных работах, не зависит от обмотчика Так, например, может быть ошибочно скомплектован набор изоляционных коробов, не соответствующих размерам пазов, плохо намотаны катушки обмотки, уменьшено или увеличено число витков в катушках, повреждена изоляция провода и т п. Такие ошибки в практике встречаются редко, однако квалифицированный обмотчик должен уметь вовремя их обнаружить и исправить, а также выяснить причины брака и принять меры к их устранению.

Поэтому укладка обмотки в пазы не является чисто механической работой, заключающейся в аккуратном пропускании проводников в паз, а требует предварительной подготовки. Обмотчик, приступая к укладке обмотки, должен познакомиться с чертежом и обмоточными данными двигателя. Он должен знать тип электродвигателя, его номинальное напряжение, число полюсов, шаг обмотки по пазам, диаметр обмоточного провода и число проводников в пазу. Необходимо проверить полученные для укладки обмотки катушки и заготовки изоляции и их соответствие обмоточным данным и чертежу. Лишь после этого можно приступить к укладке обмотки в пазы.

§ 27. МЕХАНИЗАЦИЯ ОБМОТОЧНО-ИЗОЛИРОВОЧНЫХ РАБОТ

Укладка всыпных обмоток в пазы — самая трудоемкая операция в производстве электрических машин, поэтому вопросам ее механизации уделяется много внимания. В на-

стоящее время на предприятиях, выпускающих большое число двигателей мощностью в несколько киловатт, обмоточно-изолировочные работы почти полностью механизированы.

Процесс обмотки статоров можно подразделить на несколько основных операций: изолирование пазов (т. е. установка в пазы корпусной изоляции в виде пазовых коробов), намотка катушек, укладка обмотки в пазы, заклиновка пазов, бандажирование и формовка лобовых частей обмотки, соединение и пайка или сварка схемы и контрольные операции, включающие проверку электрической прочности изоляции и правильность намотки и соединения схемы.

Рассмотрим принцип работы наиболее распространенных станков и оборудования, применяющегося в нашей промышленности для этих целей.

Изолирование пазов статора. Для изолирования всыпных обмоток от корпуса в пазы статора устанавливают корпусную изоляцию в виде пазовых коробов из листового изоляционного материала (см. рис. 75). Эта операция выполняется на полуавтоматических станках, среди которых наибольшее распространение имеют станки ИПС (обозначение типа станка образовано из первых букв выполняемой им операции — изолирование пазов статора). Станок ИПС имеет следующие механизмы (рис. 78). механизм привода, подающее устройство, формующе-отрезающее устройство, механизм поворота статора и механизм подачи пазового короба в статор Лента изоляционного материала *1*, по ширине соответствующая развернутой длине пазового короба, т. е. по длине при развернутых манжетах, протягивается подаю-

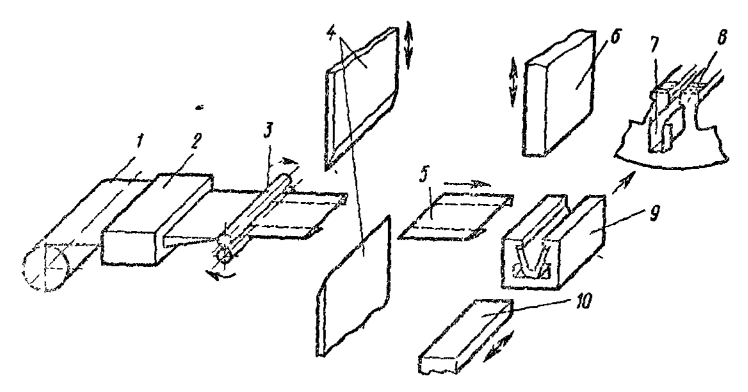


Рис 78 Принципиальная схема работы станка ИПС

щим механизмом *3* прерывистого действия через профильные направляющие *2* в формующе-отрезной механизм. В профильных направляющих происходят изгиб и отбортовка краев ленты, т. е. загиб манжет. Лента передвигается прерывисто на определенный шаг, равный нужной ширине короба, после чего подающий механизм возвращается в исходное положение, а участок ленты отрезается гильотинными ножницами *4*. Полученная заготовка короба *5* в это время находится над формующей матрицей *9*. Размеры матрицы соответствуют размерам паза статора. Пуансон *6* подает заготовку в матрицу и формует пазовый короб. Матрица одновременно служит направляющим желобом для установки отформованного короба *7* в паз статора *8*, который располагается непосредственно против матрицы. Досылатель *10* механизма подачи перемещает короб в паз, после чего статор с помощью поворотного устройства поворачивается на одно зубцовое деление, и цикл работы повторяется. Механизм подачи готового короба в паз (рис 79) имеет предохранительное устройство, которое защищает станок от случайных перегрузок Например, при смятии короба во время подачи его в паз статора (положение *I*) нагрузка на досылатель *3* возрастает Фиксатор *2*, которым связан досылатель с подвижной кареткой *1* механизма подачи, освобождается, досылатель дальше не движется, а каретка проходит вперед (положение *II*). На

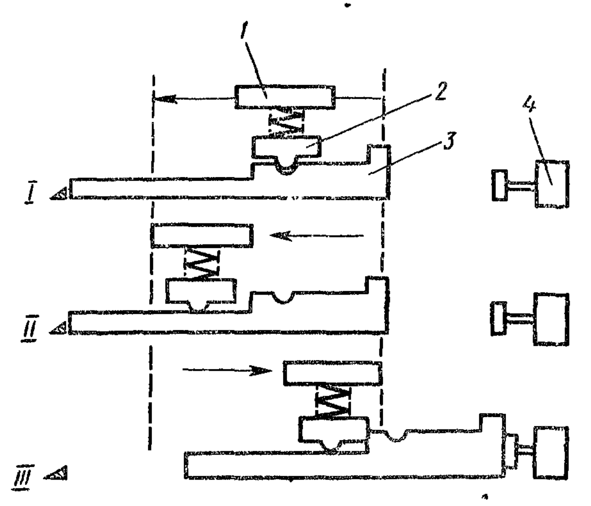


Рис. 79. Принцип действия механизма подачи станка ИПС

обратном движении фиксатор *2* захватывает досылатель и подает его назад дальше, чем при нормальной работе (положение *III*). Досылатель воздействует на конечный выключатель *4* и останавливает станок.

Существует несколько модификаций станков ИПС, в их числе ИПС-1М, ИПС-7, ИПС-8. Каждая модификация предназначается для изолирования пазов определенного типа двигателей и незначительно отличается по конструкции от других. Для изолирования пазов статоров асинхронных двигателей серии 4А с высотами осей вращения 71—100 мм применяется полуавтоматический станок ИПС-8. Станок снабжается комплектом сменных устройств, позволяющих изолировать пазы статоров различных типов двигателей этой серии. Набор шестерен механизма поворота дает возможность изолировать пазы статоров с внутренним диаметром от 65 до 120 мм с числом пазов $Z = 24$, 36, 48 и 54 при длине статора 60—160 мм. В качестве пазовой изоляции применяется синтетическая пленка толщиной 0,15—0,25 мм, поставляемая на завод в рулонах. При непрерывной работе станок изолирует до 150 пазов в минуту, следовательно, в один статор с числом пазов $Z = 54$ пазовые коробы могут быть установлены менее чем за полминуты.

Применение станков ИПС существенно сократило время на подготовку статора к укладке обмотки.

Механизированная обмотка статоров. Применяются два метода механизированной укладки обмотки в пазы статоров: совмещенный и раздельный. При совмещенном методе намотка катушек производится непосредственно с барабана с обмоточным проводом в пазы статора. При раздельном первоначально наматываются заготовки катушек, после чего они втягиваются в пазы.

Совмещенный метод намотки используется в обмоточных станках типа ОС. На торцах закрепленного на станке необмотанного статора *4* (рис. 80) устанавливаются фасонные шаблоны *3*. Число шаблонов равно числу катушечных групп в обмотке. Внутри вдоль статора движется штанга проводоводителя *5*, на которой укреплена обмоточная головка *1* с иглой *2*, входящей в паз статора. Обмоточный провод *6* с барабана через натяжное устройство пропускается через проводоводитель, обмоточную головку и иглу. При поступательном движении игла проходит внутри вдоль паза и укладывает в него обмоточный провод. После выхода иглы из паза с торца статора проводоводитель поворачивается на угол, соответствующий ширине катушки, т. е. шагу об-

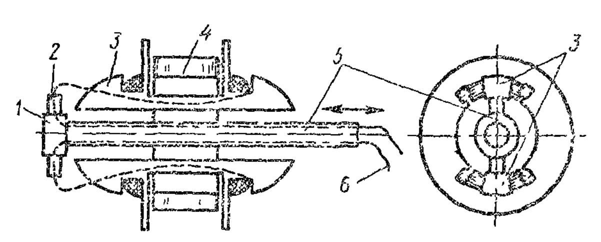


Рис 80 Схема образования обмотки статора на шаблонах

мотки, и начинает обратное движение Игла проходит вдоль паза, находящегося на расстоянии шага обмотки от первоначального, и укладывает в него вторую сторону витка катушки. После выхода иглы из паза с другого торца статора проводоводитель поворачивается на тот же угол, но в обратном направлении. Таким образом укладывается один виток катушки Цикл работы повторяется, пока не уложены все витки катушки, после чего программное устройство поворачивает статор на угол, соответствующий одному зубцовому делению, и меняет угол поворота проводоводителя для намотки следующей (меньшей) катушки той же катушечной группы После окончания намотки всей катушечной группы статор поворачивается в новое положение для намотки следующей группы и так до окончания намотки всей обмотки.

Трудности выполнения обмотки по описанной схеме заключаются в необходимости осаживать на дно пазов провод, выходящий из иглы во время ее движения вдоль паза, чтобы не образовалось перекрещивания проводов, и в обеспечении правильного расположения проводников в лобовых частях. Эти вопросы решаются на различных обмоточных станках либо с помощью фасонных шаблонов, либо отклоняющих рычагов. Фасонные шаблоны (см. рис. 80) используются, например, на станке ОС-16. Во время намотки при повороте проводоводителя в его конечных положениях провод, выходя из иглы, ложится на криволинейную часть шаблона, а при обратном движении иглы вдоль паза скользит по этой поверхности, отклоняясь к дну паза, и укладывается на ближайший к торцу статора участок шаблона, местоположение, форма и размеры которого определяют положение и форму лобовой части катушки.

Способ осаживания проводников на дно паза и формирования лобовых частей с помощью отклоняющих рычагов применяется на станке ОС-21 и ряде других. Он заключается

в следующем (рис. 81). Статор *8* закрепляется на станке в гнезде *9*. К его торцам прижимаются обоймы *4* с крючьями, которые служат для удержания лобовых частей катушек. Обмоточный провод *6* с барабана через натяжное устройство поступает в проводоводитель *5*, на котором укреплена обмоточная головка *2* с иглами *1* для укладки проводов в пазы статора и отклоняющими передними и задними рычагами *3*. Все отклоняющие рычаги шарнирно соединены со штоком *7*, проходящим внутри проводоводителя. При поступательном движении проводоводителя шток неподвижен относительно него и занимает среднее положение, при котором отклоняющие рычаги сжаты. Когда проводоводитель достигает крайнего переднего положения и останавливается, шток продолжает движение и с помощью шарниров *10* раздвигает отклоняющие рычаги. При этом рычаги отводят обмоточный провод от торца статора, укладывают его на крючья оснастки и осаживают на дно паза. Проводоводитель с обмоточной головкой поворачивается на угол, соответствующий шагу катушки, и обмоточный провод занимает место, предназначенное для ее лобовой части. После этого шток проводоводителя возвращается в среднее положение и рычаги сжимаются. Проводоводитель совершает обратное движение вдоль статора, укладывая провод в другой паз по шагу обмотки. Достигнув крайнего положения, он снова останавливается, шток продолжает движение и раздвигает задние отклоняющие рычаги, которые при повороте проводоводителя укладывают провод на крючья оснастки и таким образом формируют вторую лобовую часть витка.

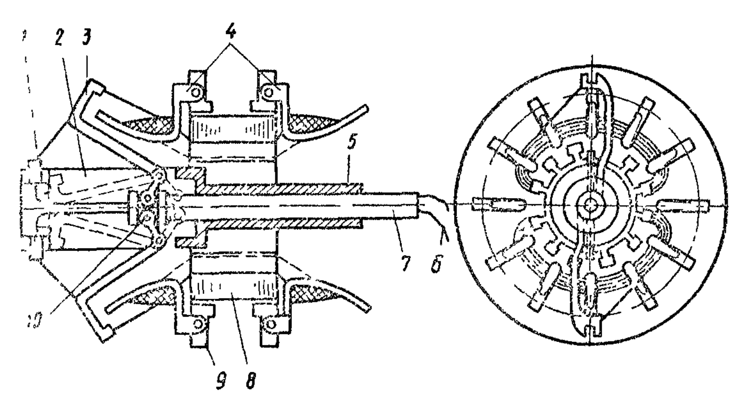


Рис. 81. Схема образования обмотки статора с помощью отклоняющих рычагов

Цикл работы повторяется до окончания намотки всей катушки.

На рис. 82 показана кинематическая схема станка ОС-21. Статор *3* закрепляется в гнезда *7*. Крючья оснастки *6* собраны в двух обоймах *8*, которые во время установки перемещаются в осевом направлении с помощью винтов *5*, приводимых во вращение от электродвигателя *4* через цепную передачу. Проводоводитель *11* с обмоточной головкой *9* и отклоняющими рычагами *10* получает возвратно-поступательное движение от кулисно-рычажного механизма *14* и в двух крайних положениях при выходе иглы обмоточной головки из пазов имеет зоны покоя. В этих положениях шток *13* продолжает движение и раздвигает отклоняющие рычаги, после чего проводоводитель поворачивается на угол по шагу катушки механизмом *12*, укладывая лобовые части витков на крючья оснастки. При переходе к намотке следующей катушки или следующей катушечной группы гнездо, в котором закреплен статор, поворачивается так, что иглы обмоточной головки располагаются против нужных пазов. Поворот статора осуществляется от двигателя *1* через механизм *2*, обеспечивающий заданный угол поворота.

Все операции, включая намотку катушек, изменение шага и переход на намотку следующих катушечных групп, осуществляются автоматически по составленной при наладке станка программе. Вручную производятся только установка и съем статора со станка. Станок рассчитан на одновременную намотку трех катушечных групп. Он предназначен для обмотки статоров электродвигателей серии 4А с внутренним диаметром статора 95—145 мм и длиной сердечника статора 100—160 мм. Скорость намотки до 140 двойных ходов в минуту.

Раздельный метод намотки состоит из предварительной намотки заготовок катушек (катушечных групп) на шаблоне, съема их с шаблона, установки в приспособление для переноса, подачи приспособления на станок и втягивания катушек в пазы статора с одновременной установкой пазовых крышек. Все катушечные группы обмотки нельзя втянуть в пазы статора одновременно из-за того, что их лобовые части располагаются в разных плоскостях. Поэтому втягивание производят в несколько приемов, по одной или нескольким катушечным группам одновременно. Число втягиваний зависит от количества катушечных групп в обмотке. Чтобы улучшить условия втягивания последующих катушечных

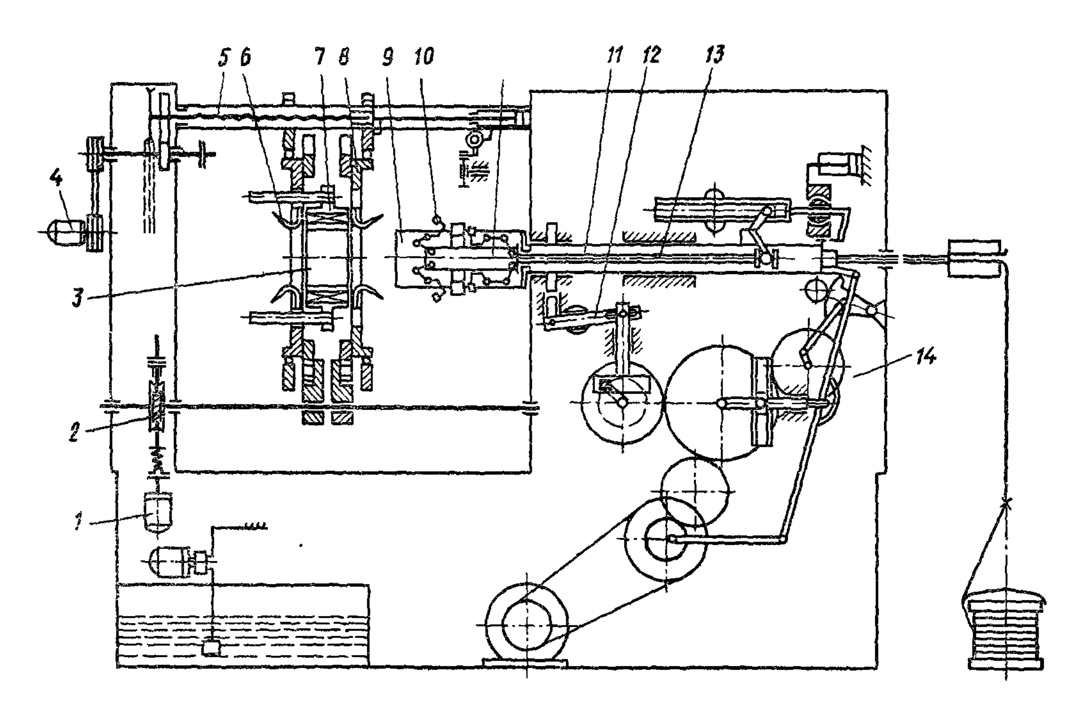


Рис. 82. Кинематическая схема станка ОС-21

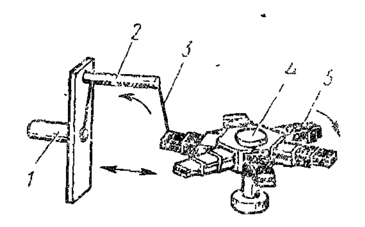


Рис 83. Намотка катушек на неподвижные шаблоны

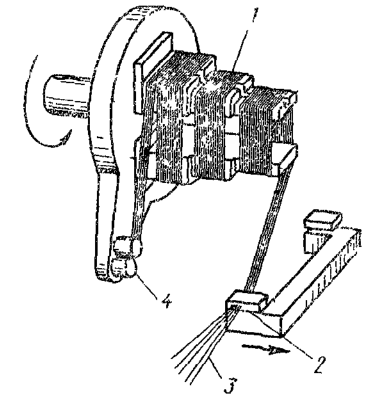


Рис 84. Намотка катушек на вращающиеся шаблоны

групп, лобовые части уже уложенных катушек должны быть отжаты к торцам сердечника.

Заготовки катушек наматываются на намоточных станках на шаблоны. Если обмотка выполняется одним или двумя параллельными проводами, то применяют технологический цикл намотки с неподвижными шаблонами и вращающимися мотовилами (рис. 83). Шаблоны *5* устанавливаются на револьверной головке *4* станка. Шаблоны имеют цилиндрическую форму со ступенчато изменяющимися по длине шаблона диаметрами. Число ступеней равно числу катушек в группе, а диаметр ступеней определяется средней длиной витка катушки в катушечной группе. Обмоточный провод *3* проходит через полую ось намоточной головки *1* и наматывается мотовилом *2* на шаблон. В процессе намотки намоточная головка сдвигается вдоль оси шаблона, и витки провода укладываются в один слой без перекрещивания.

Для обмоток, образованных несколькими параллельными проводами, применяют намотку на вращающиеся шаблоны (рис. 84). Параллельные провода *3* с отдельных барабанов подаются через натяжное устройство *2* на вращающийся шаблон *1*. Концы проводов перед намоткой закрепляются на шаблоне зажимом *4*.

После намотки катушечной группы или нескольких катушечных групп на шаблоны их витки переводят в приспособление для съема и переноса катушек (рис. 85), состоящее из диска *1* и стальных гладких штырей *2*, число которых равно числу пазов статора. Катушки с шаблона набирают на штыри приспособления и переносят на станок для втягивания катушек в пазы. Последовательность выполнения этой операции показана на рис. 86. Приспособление встав-

ляют (рис. 86, *а*) в штыревую оправку *1*, и катушки переводят из приспособления в щели между штырями оправки (рис. 86, *б*). В эту же оправку устанавливают пазовые крышки *2*, после чего положение свободных концов штырей оправки фиксируют стабилизатором *3*. Продольные выступы на его поверхности одновременно служат направляющими для сердечника статора *4*, который надевается на стабилизатор (рис. 86, *в*). Внутри оправки находится толкатель *5*, который при своем движении вдоль сердечника статора захватывает лобовые части обмотки и втягивает катушки в пазы. Одновременно с витками катушек толкатель продвигает и пазовые крышки, заклинивая пазы (рис. 86, *г*).

Наша промышленность выпускает несколько типов станков для втягивания катушек, рассчитанных для двигателей различных размеров: станки ОСР-1 – для двигателей с внутренним диаметром статора 45–100 мм; ОСР-3 – для двигателей с внутренним диаметром статора 100–180 мм; ОСР-4 – для двигателей большей мощности с внутренним диаметром статора 150–320 мм и длиной 110–270 мм.

После втягивания первых катушечных групп статор подается на станок для разжима их лобовых частей. Для этого используются либо две конусные оправки, которые прижимают лобовые части катушек к статору с обоих его торцов, либо оправки (формующие головки) с радиально выдвигающимися секторами. Далее статор снова устанавливают на станок для втягивания следующих катушечных групп. В станках для разжима лобовых частей обмоток

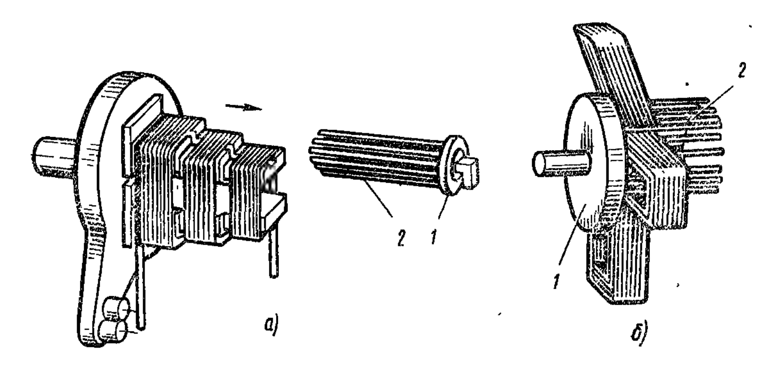


Рис. 85. Приспособление для переноса катушек:
а – перевод катушки с шаблона на приспособление, *б* – положение катушки на приспособлении

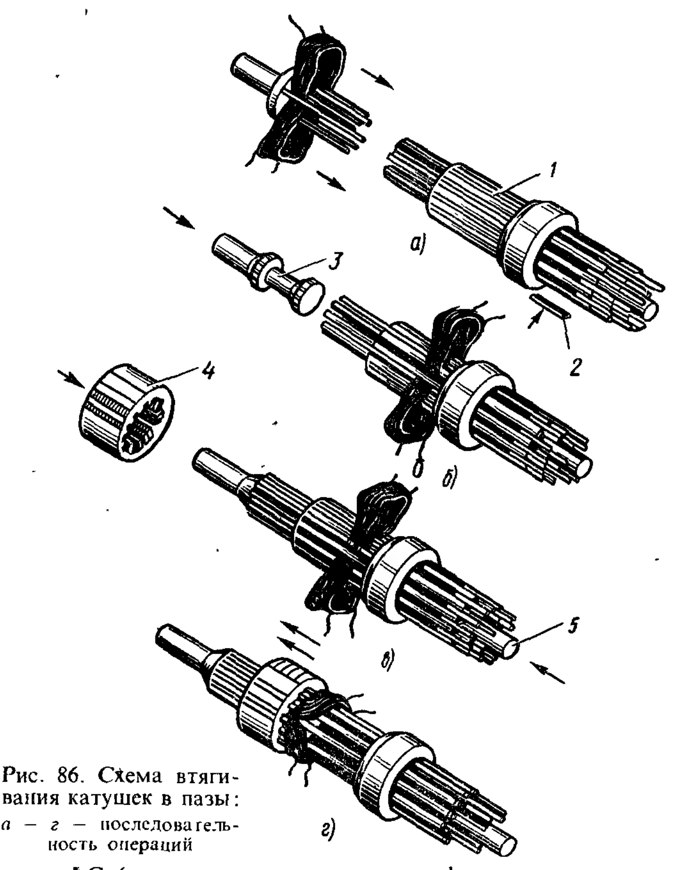


Рис. 86. Схема втягивания катушек в пазы:
а — г — последовательность операций

типа ФС (название станка от слов: формование статорной обмотки), применяемых совместно со станками ОСР для втягивания катушек, используются формующие головки с радиально выдвигающимися элементами, что позволяет избежать смещения и смятия проводников обмотки в лобовых частях.

Операции намотки, втягивания катушек и разжатия их лобовых частей производятся на различных станках, которые устанавливают рядом друг с другом.

Механизация укладки обмотки в пазы может быть осуществлена в том случае, если сердечники машины, конструкция изоляции и обмоточные провода удовлетворяют ряду требований. Так, в обмотке может применяться только провод с повышенной механической прочностью изоляции

(см. § 5), так как на обмоточных станках он испытывает большие механические напряжения. Пазовые коробы должны быть выполнены не из нескольких слоев изоляционного материала, как при ручной укладке, а из одного, имеющего большую электрическую и механическую прочность. Пазы статора должны иметь более широкие шлицы для прохода иглы проводоукладчика или для втягивания катушек при раздельном способе укладки и т. п. Поэтому механизировать укладку обмотки в машинах старых серий не удается. При проектировании новых серий обязательно учитывают требования, которые предъявляются к машинам, предназначенным для механизированной укладки обмотки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы изображения схем обмоток вы знаете?
2. Чему равно число пазов на полюс и фазу обмотки, изображенной на рис. 68?
3. При каком числе полюсов статора однослойную концентрическую обмотку выполняют с косой катушечной группой?
4. Какую обмотку называют шаблонной? Чем она отличается от однослойной концентрической?
5. Зачем на рабочем месте обмотчика устанавливают поворотный стол и поворотные ролики?
6. Как соединяют между собой проводники в схеме обмотки?
7. Объясните по рис. 78, как работают механизмы станка для изолировки пазов статора.
8. Поясните разницу совмещенного и раздельного методов механизированной обмотки статоров.
9. Каков принцип образования витков обмотки на станке ОС-21 с помощью отклоняющих рычагов?
10. Для чего нужно приспособление для съема и переноса катушек и как оно устроено?
11. Как происходит втягивание катушек в пазы статора при раздельной намотке?
12. Для чего необходимо разжимать лобовые части втянутых в пазы статора первых катушек?

ГЛАВА IX
ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 28. ТИПЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Двухслойные обмотки могут быть катушечными или стержневыми. Катушечные двухслойные обмотки применяются в статорах большинства машин мощностью более 12—15 кВт. Стержневые двухслойные обмотки применяют

в статорах машин большой мощности и в фазных роторах асинхронных двигателей.

Основным достоинством двухслойных обмоток, которое определяет их широкое распространение, является возможность выполнить их с укороченным шагом, что улучшает характеристики машины.

В двухслойных обмотках в каждом пазу размещаются по две стороны разных катушек, поэтому общее число катушек в ней равно числу пазов Z, а число катушек в одной фазе – Z/m. Так как число катушек в катушечной группе равно числу пазов на полюс и фазу ($q = Z/2pm$), то в двухслойных обмотках число катушечных групп в каждой фазе равно числу полюсов обмотки $2p$.

§ 29. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Рассмотрим принцип построения схемы двухслойной обмотки на примере обмотки статора трехфазной машины с $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$, т. е. с теми же данными, что и приведенные в гл. VIII схемы однослойных обмоток.

В каждом пазу двухслойной обмотки размещаются две стороны разных катушек, поэтому на рис. 87, *а* показаны 24 пары линии пазов: одна из них – сплошная – обозначает сторону катушки, лежащей вверху паза, ближе к его шлицу, а другая – пунктирная – сторону катушки, лежащей на дне паза. Разделим линии пазов по числу полюсов на четыре полюсных деления τ, в каждом из них будет

$\tau = \dfrac{Z}{2p} = \dfrac{24}{4} = 6$ пазов, и в пределах полюсных делений

разметим фазы. Число пазов на полюс и фазу $q = Z/2pm = 2$. Стрелками на сплошных линиях, соответствующих верхним сторонам катушек, покажем направления мгновенных значений токов в них. Оно одинаковое во всех фазах в пределах одного полюсного деления и меняется на обратное при переходе к соседнему полюсному делению. Направление токов в нижних сторонах катушек, т. е. на пунктирных линиях, показывать не надо, так как оно будет зависеть от укорочения шага и при составлении схемы роли не играет.

Вначале рассмотрим обмотку с диаметральным шагом. На рис. 87, *б* показано соединение лобовыми частями пазовых сторон катушек, лежащих на расстоянии полюсного деления друг от друга, т. е. с шагом $y = \tau = 6$: верхние стороны катушек *1* и *2* пазов соединяются соответственно

с нижними сторонами катушек $(1+6)=7$-го и $(2+6)=8$-го пазов. Полученные две катушки ($q=2$) соединены последовательно между собой в катушечную группу. На рис. 87, *в* такие же соединения проделаны для остальных катушек и катушечных групп, входящих в фазу *А* обмотки, и катушечные группы соединены между собой. Чтобы принятые ранее направления токов (см. рис. 87, *а*) сохранились, соседние катушечные группы одной фазы должны быть соединены между собой встречно. Встречное соединение катушечных групп, т. е. соединение конца первой группы этой фазы с концом второй и начала второй с началом третьей группы и также других групп одной фазы, является характерной закономерностью для всех схем двухслойных обмоток данного типа.

Рис 87. Построение схемы двухслойных обмоток:

а — разделение пазов по полюсным делениям, *б* — соединение катушек, *в* — соединение катушечных групп одной фазы обмотки

Обмотка остальных фаз соединяется аналогично. На рис. 88 приведена полная схема разобранной обмотки. Начала фаз *С1*, *С2* и *С3*, так же как и в однослойных обмотках (см. § 25), расположены через $2q=2\cdot 2=4$ паза друг от друга.

Для проверки правильности выполненных соединений при вычерчивании схемы можно воспользоваться следующим

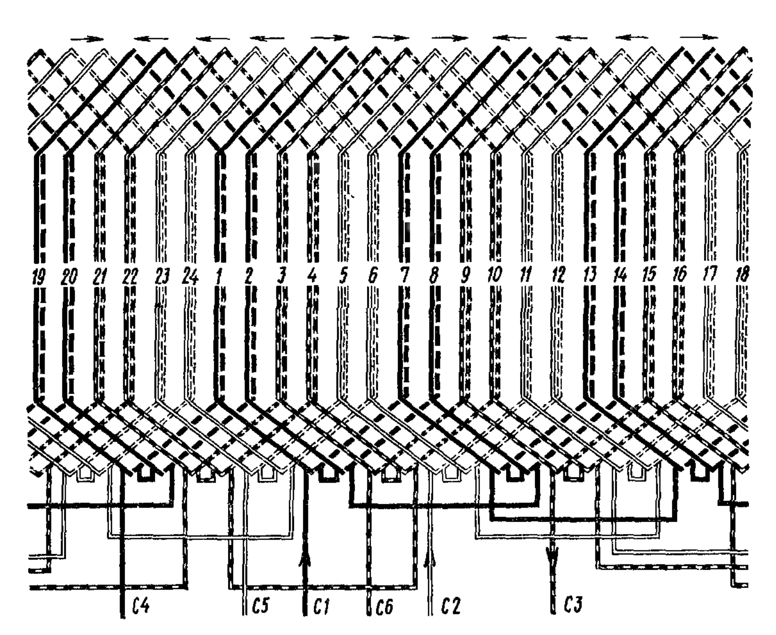


Рис 88 Схема двухслойной обмотки с $Z=24$, $2p=4$ и диаметральным шагом

методом. На линиях, обозначающих начала фаз *C1*, *C2* и *C3*. отметим стрелками мгновенные направления токов в фазах. В трехфазной системе токов всегда в двух фазах эти направления совпадают, а в третьей (безразлично какой) будет противоположно, или значение тока равно нулю. Поэтому на рис. 88 на выводе *C3* указано направление, противоположное *C1* и *C2*. Далее, обходя катушки и катушечные группы по вычерченным соединениям каждой из фаз, отметим над катушечными группами также стрелками направление обтекания их током. Проделаем эту операцию для всех фаз, как показано на рис. 88. В пределах каждого полюсного деления направления стрелок над катушечными группами во всех фазах совпадают и меняются на обратное над соседними полюсными делениями. Таких изменений направления столько, сколько полюсов в машине. Если после разметки стрелок на схеме не получается такого чередования, то схема вычерчена неверно. Следует проверить правильность расположения начал каждой из фаз и соединений между катушечными группами и исправить неточность. Машина с неправильно соединенной обмоткой работать не будет.

Мы рассмотрели обмотку с диаметральным шагом с $2p = 4$ и $q = 2$. При любом укорочении шага и при любом числе $2p$ и q принцип соединения схем остается таким же. На рис. 89 приведена схема обмотки той же машины ($Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$), но с укороченным шагом $y = \beta\tau = 0{,}8 \cdot 6 \approx 5$. Сравнивая обе схемы (см. рис. 88 и 89), видим, что все соединения катушек и катушечных групп у них одинаковы. Обмотки отличаются друг от друга только шириной катушек и расположением их сторон, лежащих в нижней части паза (пунктирные линии на схеме). При диаметральной обмотке в каждом из пазов расположены верхние и нижние стороны катушек одной и той же фазы. В обмотке с укороченным шагом из-за того, что ширина катушек уменьшилась, в некоторых пазах размещаются стороны катушек, принадлежащих разным фазам, например (см. рис. 89) в пазах *2, 4, 6, 8* и др.

Схема-развертка удобна для практического использования при соединении обмотки, но при большом числе пазов и нескольких параллельных ветвях она теряет это качество, так как становится громоздкой и трудно читается из-за

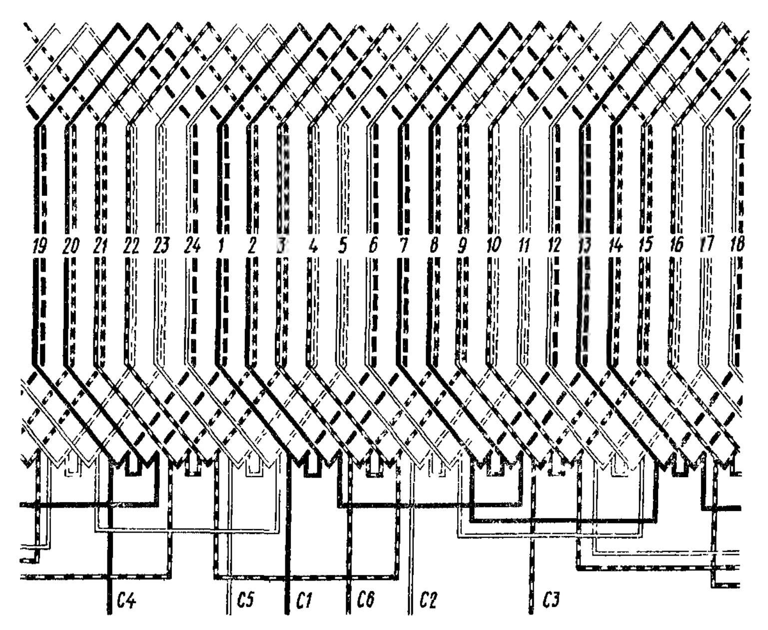


Рис 89. Схема обмотки с укороченным шагом с $Z=24$, $2p=4$

большого количества различных нанесенных на нее соединений. В то же время, внимательно рассматривая развернутую схему, можно заметить, что она содержит ряд одинаковых элементов. Поэтому ЕСКД позволяет использовать так называемые условные схемы обмоток. В них принято условное изображение не одной катушки, как в схеме-развертке, а целой катушечной группы, которая обозначается одним прямоугольником независимо от числа катушек в ней (рис. 90). Каждый прямоугольник имеет два выводных конца: начало первой катушки в группе и конец последней. Такое условное изображение основано на том же, что и изображение одним контуром многовитковой катушки в схеме-развертке: все витки, так же как и все катушки в одной катушечной группе, соединяются всегда последовательно. Чтобы указать, какое место занимает катушечная группа от начала обмотки и сколько катушек она содержит, в прямоугольнике над диагональю пишут номер катушечной группы, считая их по порядку от начала первой фазы обмотки, а под диагональю указывают число катушек в этой катушечной группе. Условная схема той же обмотки, развернутая схема которой показана на рис. 88 или 89, изображена на рис. 91. Проследим на ней направление обтекания током катушечных групп всех фаз и отметим эти направления стрелками. Стрелки одинакового направления группируются по три по полюсным делениям машины. Как видно, в этой схеме содержится меньше информации, чем в схеме-развертке, так как в ней не указано число пазов и нельзя определить, какой шаг принят в обмотке: условная схема, изображенная на рис. 91, соответствует обмотке и с диаметральным шагом, и с укороченным (см. рис. 88 и 89). Поэтому условные схемы сопровождаются надписями о числе пазов, шаге обмотки, числе полюсов и др.

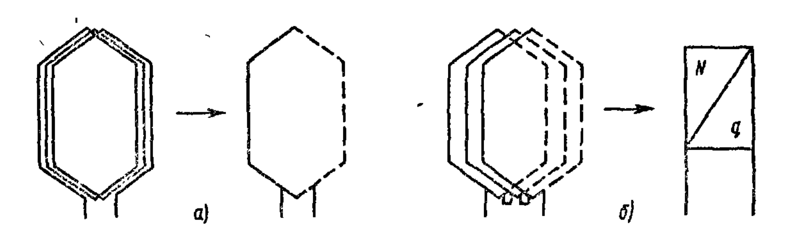


Рис. 90. Условное изображение на схемах:
а – витков в катушке, *б* – катушек в катушечной группе

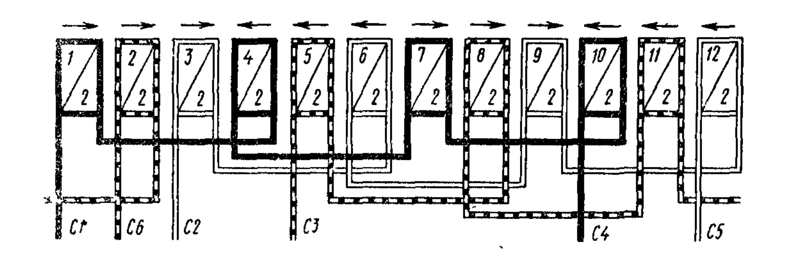


Рис. 91. Условная схема обмотки с $Z=24$, $2p=4$, $a=1$

Все фазы обмотки в трехфазных машинах всегда соединяются одинаково, поэтому условные схемы можно еще сократить. Достаточно привести схему соединений катушечных групп только одной фазы и сделать соответствующие надписи, как показано на рис. 92. На этом рисунке приведены только катушечные группы первой фазы: 1, 4, 7 и 10-я, отмечены стрелками направления обтекания током катушечных групп и показаны межгрупповые соединения. Катушечные группы других фаз на схеме не показаны, но, зная, что все фазы соединяются одинаково, можно совершенно точно сказать, как должна быть соединена вся уложенная в пазы обмотка. За начало второй фазы (см. рис. 91) должно быть взято начало 3-й (1 + 2) катушечной группы, с ней будут соединены 6-я (4 + 2), 9-я (7 + 2), 12-я (10 + 2) катушечные группы. Начало третьей фазы будет началом 5-й (3+2) катушечной группы. В нее войдут 5, 8, 11 и 2-я катушечные группы. Концами фаз будут являться концы 10, 12 и 2-й катушечных групп. Если в условной схеме обмотки не указаны значения числа q, то она может служить как бы типовой схемой для всех двухслойных обмоток с данным числом $2p$ и числом параллельных ветвей a независимо от числа пазов в машине.

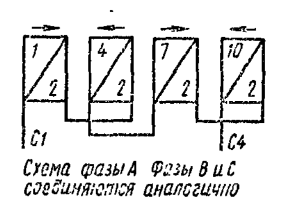


Рис. 92. Схема одной фазы обмотки с $2p = 4$, $a=1$

§ 30. СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК В НЕСКОЛЬКО ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ

Соединение обмотки в две или несколько параллельных ветвей на условной схеме выполняют следующим образом. Чертят столько прямоугольников, изображающих катушечные группы, сколько полюсов в машине – это катушечные группы одной фазы. Начальный вывод первого прямоугольника принимают за начало фазы и над каждым прямоугольником отмечают стрелками направление обтекания током катушечных групп: стрелки меняют направление над каждым прямоугольником. Выводные концы прямоугольников соединяют так, чтобы образовалось нужное число параллельных ветвей и в каждой из них было одинаковое число прямоугольников – катушечных групп обмотки. Направление тока от начала фазы в каждой из ветвей должно совпадать с направлением стрелок. Для двухполюсных машин ($2p = 2$) при $a = 1$ такое соединение показано на рис. 93, *а*, а при $a = 2$ – на рис. 93, *б*. В этой обмотке при $a = 2$ в каждой параллельной ветви содержится по одной катушечной группе, направление обтекания током катушечных групп совпадает с принятым направлением стрелок. Это единственно возможное соединение обмотки машины с $2p = 2$ в две параллельные ветви. Обмотку четырехполюсной машины можно соединить в две или в четыре параллельные ветви (рис. 94, *а*, *б*). И в том и другом случае направление обтекания током катушечных групп сохранено таким же, как и в схеме с $a = 1$ (см. рис. 92) и в каждую параллельную ветвь включено одинаковое количество катушечных групп.

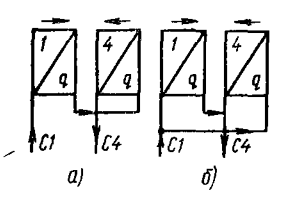


Рис 93 Соединение катушечных групп в обмотке с $2p = 2$

а – при $a = 1$, *б* – при $a = 2$

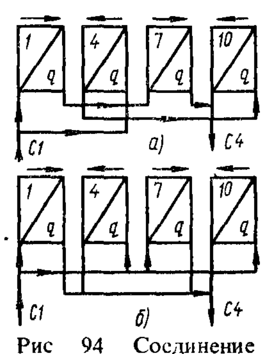


Рис 94 Соединение катушечных групп в обмотке с $2p = 4$:

а – при $a = 2$, *б* – при $a = 4$

Обмотку из шести катушечных групп, т. е. шестиполюсной машины, можно соединить в две, три или шесть параллельных ветвей (рис. 95). Принцип соединения остается постоянным независимо от числа полюсов и числа параллельных ветвей обмотки.

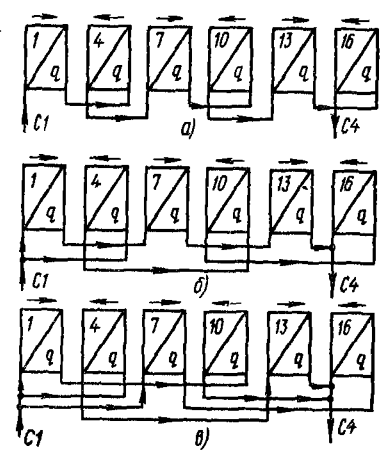


Рис 95 Соединение катушечных групп в обмотке с $2p = 6$.
а – при $a = 1$, *б* – при $a = 2$, *в* – при $a = 3$

Из рассмотренных примеров видно, что число параллельных ветвей в двухслойной обмотке всегда кратно числу полюсов машины. Возможное число параллельных ветвей можно определить из условия $2p/a$ = целому числу. Наибольшее возможное число параллельных ветвей $a_{max} = 2p$. В практике редко применяют обмотку с числом параллельных ветвей большим, чем 4 или 6, так как при этом более вероятно неравномерное распределение токов между ними и перегрузка отдельных участков обмотки из-за некоторого неравенства сопротивлений ветвей.

§ 31. ОБМОТКИ С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

В многополюсных машинах часто выбирают такие соотношения чисел пазов Z и чисел полюсов $2p$, что $q = Z/2pm$ выражается неправильной дробью. Так, например, крупные многополюсные синхронные генераторы в большинстве случаев для улучшения их характеристик выполняются с дробным числом пазов на полюс и фазу. В некоторых асинхронных машинах число q также выражается неправильной дробью со знаменателем, равным 2, т. е. $q = 1^1/_2$, $2^1/_2$, $3^1/_2$ и т. д. Так приходится поступать, например, при использовании одного штампа листов статора с $Z = 90$ для двигателей с $2p = 10$ и $2p = 12$. В десятиполюсной машине $q = \frac{Z}{2pm} = \frac{90}{10 \cdot 3} = 3$, а в двенадцатиполюсной $q = \frac{90}{12 \cdot 3} =$ $= 2^1/_2$ – дробное число.

Обмотки с дробным числом q могут быть соединены в электрически симметричные схемы. Для этого их катушечные группы формируют не из одинакового числа катушек, равного q, как в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу, а из разного; причем в одной части катушечных групп число катушек в группе берут на одну больше, чем в другой. Число малых катушечных групп и число больших катушечных групп подбирают таким образом, чтобы в среднем на одну группу приходилось число катушек, равное выбранному дробному числу q.

Катушечные группы укладывают в пазы в определенной последовательности. Так, например, при $q = 2^1/_2$ надо поочередно укладывать одну большую катушечную группу из трех катушек и одну малую, состоящую из двух катушек. Чередование больших и малых катушечных групп повторяется с определенным периодом. В данном случае (при $q = 2^1/_2$) период чередования равен двум катушечным группам. Последовательность чередования больших и малых катушечных групп в периоде записывается рядом цифр. Общая сумма цифр равна числу катушек в одном периоде, а каждая цифра показывает, сколько катушек содержится в очередной катушечной группе. Для обмотки с $q = 2^1/_2$ таким рядом будет |3 2|3 2|3 2|... Эта запись означает, что в каждом периоде содержится две катушечные группы (две цифры). Первая группа состоит из трех катушек, вторая — из двух катушек Всего катушек в периоде $3 + 2 = 5$. Дробное число q для составления схем записывают в общем виде так:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d},$$

где b — целая часть числа q; c — числитель; d — знаменатель дробной части числа q; $N = bd + c$ — числитель неправильной дроби, которой можно записать число q.

Во всех обмотках с дробным q всегда соблюдается следующая закономерность. Количество катушек в малых катушечных группах равно b; количество катушек в больших катушечных группах на единицу больше, т. е. $(b + 1)$. В каждом периоде содержится d катушечных групп, из которых c больших и $(d - c)$ малых. Всего катушек в периоде $N = 5$.

Распределение пазов, в которых должны быть уложены верхние стороны катушек обмотки с $q = 2^1/_2$ по фазам, показаны на рис. 96, *а*. На рис. 96, *б* приведено соединение катушечных групп одной фазы, а на рис. 96, *в* показан

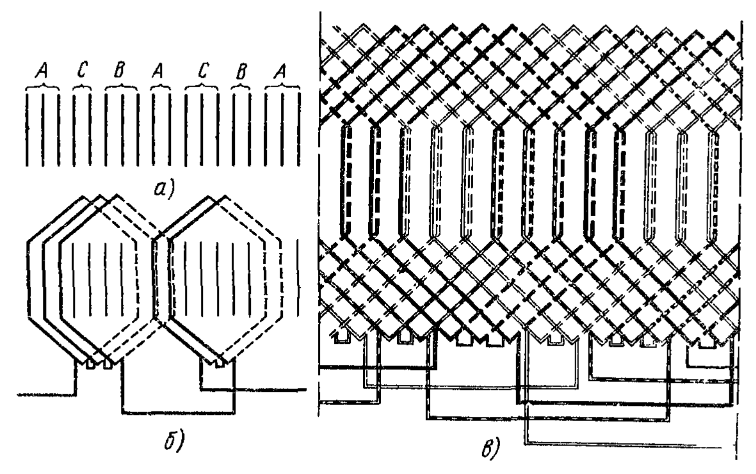


Рис 96. Построение схемы обмотки с $q = 2^1/_2$:
а – распределение пазов, *б* – соединение катушечных групп одной фазы, *в* – элемент схемы обмотки

элемент схемы обмотки с $q = 2^1/_2$. Как видно, большие и малые катушечные группы чередуются при обходе обмотки по пазам в последовательности |3 2|3 2|3 2|...

Симметричную схему обмотки электрической машины можно построить не при всяком дробном числе q. Во-первых, при составлении обмоток стремятся избегать дробных чисел q со знаменателем, равным или кратным трем, так как в трехфазных машинах такая обмотка не будет вполне симметричной. Во-вторых, условия симметрии требуют, чтобы в каждой фазе содержалось целое число периодов чередования больших и малых катушечных групп. В каждой фазе двухслойной обмотки $2p$ катушечных групп, а в периоде чередования – d катушечных групп. Следовательно, условием симметрии обмотки является $2p/d$ = целому числу. При этом в каждой фазе будет равное число катушек и одинаковое число периодов.

Параллельные ветви в обмотках с дробным q могут быть образованы только из катушечных групп, составляющих целое число периодов чередования, так как иначе в них будет разное число катушек.

При составлении схем обмоток, в которых дробная часть числа q равна $1/d$ или $(d-1)/d$, последовательность чередования больших и малых катушечных групп безраз-

лична; например, для обмоток с $q = 1^1/_2$ можно чередовать катушечные группы в последовательности либо |2 1|2 1|..., либо|1 2|1 2|... Для обмоток с $q = 2^3/_4$ может быть принято чередование |2 3 3 3|2 3 3 3|..., или |3 2 3 3|3 2 3 3|..., или любое другое, образованное перестановкой этих цифр в пределах периодов. Эти чередования отличаются друг от друга только выбором начальной катушки первой фазы и полностью равноценны.

В других случаях, когда $1 < c < (d-1)$ например, в обмотках с $q = 1^2/_5$ или $q = 2^3/_8$ и т. п., благоприятную с точки зрения симметрии обмотки последовательность чередования находят различными способами. Наиболее простой из них заключается в следующем. По значениям $q = b + \frac{c}{d}$ составляют таблицу, имеющую c строк и d столбцов (рис. 97). В клетки таблицы вписывают числа катушек в катушечных группах. Заполнение таблицы начинают с верхней левой клетки и заполняют первый столбец, вписывая в него числа катушек в больших катушечных группах, т. е. $(b+1)$. Таких катушек в периоде чередования всегда будет c, и они заполняют весь первый столбец. Далее начинают заполнять второй столбец также с верхней клетки, вписывая в него числа катушек в малых катушечных группах — числа b столько раз, сколько малых катушечных групп содержится в периоде чередования, т. е. $(d-c)$ раз. Далее продолжают заполнение таблицы последовательно по вертикальным столбцам, как показано стрелками на рис. 97, пока она вся не будет заполнена. Нужное чередование читают по строкам заполненной таблицы. Для пояснения метода составим таблицу чередования катушечных групп в обмотке с $Z = 114$, $2p = 16$, $q = 2^3/_8 = 2 + {}^3/_8 = {}^{19}/_8$. В этой обмотке $b = 2$; $c = 3$; $d = 8$. Составляем таблицу из $c = 3$ строк и $d = 8$ столбцов (табл. 5). Вначале заполняем первый столбец, вписывая в него числа катушек в больших катушечных группах. Они равны $b + 1 = 2 + 1 = 3$.

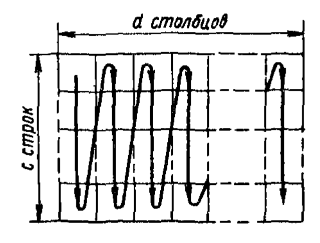


Рис. 97. Последовательность заполнения таблицы для определения чередования катушечных групп в обмотке с дробным q

Таблица 5. **Чередование катушечных групп в обмотке с $q = 2^3/_8$**

3	2	2	3	2	2	3	2
3	2	2	3	2	3	2	2
3	2	3	2	2	3	2	2

Цифрами 3 заполняется первый столбец, так как число больших катушек в периоде $c = 3$. Начиная с верхней клетки второго столбца, вписываем числа катушек в малых катушечных группах, равные $b = 2$ столько раз, сколько малых катушечных групп в периоде, т. е. $d - c = 8 - 3 = 5$. Потом, продолжая заполнение, записываем последовательно снова три раза цифры 3 и пять раз цифры 2 и т. д., пока вся таблица не окажется заполненной. По любой из строк таблицы читаем нужное чередование больших и малых катушечных групп, например, по первой строке |3 2 2 3 2 2 3 2|3 2 2 3 2 2 3 2|. Как видно, каждый период содержит $d = 8$ катушечных групп и $N = 19$ катушек. Чередование в других строках таблицы такое же, разница только в начале отсчета.

Для определения чередования больших и малых катушечных групп и расположения начал фаз в обмотках с часто встречающимися дробными числами q можно воспользоваться данными табл. 6. Если целая часть дроб-

Таблица 6. **Чередование катушечных групп в обмотках с дробным числом**

q	Последовательность чередования катушечных групп	Расположение начал фаз – первые катушки катушечных групп
$1^1/_4$	|1112|1112|1112|...	1, 5, 9
$1^1/_2$	|21|21|21|21|...	1, 3, 5
$1^3/_4$	|1222|1222|1222|...	1, 5, 9
$1^1/_5$	|11112|11112|11112|...	1, 11, 21
$1^2/_5$	|21211|21211|21211|...	1, 11, 21
$1^3/_5$	|21212|21212|21212|...	1, 11, 21
$1^3/_8$	|21121121|21121121|21121121|...	1, 9, 17
$1^5/_8$	|21212212|21212212|21212212|...	1, 9, 17

ного q, для которого нужно определить чередование катушек и положение начал фаз, больше 1, то все цифры во втором столбце таблицы (порядок чередования катушечных групп) надо увеличить на разность между этим числом и единицей. Номера катушечных групп, в которых располагаются начала фаз (третий столбец таблицы), не изменяются. Например, данные для обмотки с $q = 2^3/_4$ смотрим по третьей строке таблицы ($q = 1^3/_4$): порядок чередования катушечных групп|2 3 3 3|2 3 3 3|...; начала фаз расположены в первых катушках 1, 5 и 9-й катушечных групп

§ 32. СХЕМЫ ОБМОТОК МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Частота вращения поля статора асинхронных машин $n_1 = \frac{60f}{p}$ (f — частота тока в сети). Частота вращения асинхронных двигателей $n = n_1(1-s)$, где s — скольжение двигателя. При нормальной нагрузке скольжение составляет несколько процентов и двигатели работают с частотой всего на 2—3 % меньшей, чем частота вращения поля. В то же время во многих механизмах требуется изменять скорость при различных режимах работы. Чаще всего для приводов таких механизмов используют двигатели постоянного тока, но в ряде случаев применяют также и асинхронные двигатели как более дешевые и надежные. В небольших пределах частота вращения асинхронных двигателей может быть уменьшена за счет снижения питающего напряжения. При этом снижается момент на валу двигателя и при той же нагрузке уменьшается частота вращения. В асинхронных двигателях с фазными роторами можно уменьшить частоту вращения, включив в цепь ротора активное сопротивление, т. е. соединив контактные кольца через трехфазный реостат. Однако при этих способах регулирования резко возрастают потери и ухудшается кпд двигателей.

Более экономично регулировать частоту вращения асинхронных двигателей изменением частоты вращения поля статора. Это можно осуществить, если изменить с помощью преобразователя частоту тока питания двигателя f или число полюсов обмотки $2p$. Последний способ не требует каких-либо дополнительных устройств и поэтому широко применяется в практике, несмотря на то, что частота вращения двигателя изменяется только ступенями. Частота вращения поля равна 3000 об/мин в машине при $2p = 2$, 1500 об/мин при

$2p = 4$, 1000 об/мин при $2p = 6$ и т. д. Частота вращения двигателей с разными числами полюсов меняется в таком же соотношении.

Чтобы изменить число полюсов двигателя, необходимо выполнить специальные схемы обмоток, которые называют многоскоростными. Многоскоростные двигатели выпускаются только с короткозамкнутым ротором, так как изменение числа полюсов на фазном роторе очень сложно из-за необходимости устанавливать дополнительные контактные кольца, переключатели и т. п. Изменения числа полюсов статора можно достичь двумя путями: установкой в пазы статора двух независимых обмоток, выполненных на разные числа полюсов, или переключением схемы соединения катушечных групп одной обмотки. Первый способ дает возможность получить любые соотношения между числами полюсов и, следовательно, между частотами вращения двигателя. Недостатком такого способа регулирования является неполное использование объема пазов статора, так как в пазы укладываются обе обмотки, а двигатель работает только на одной из них поочередно. Вторая обмотка в это время отключена и занятая ею часть объема пазов не используется. Это вызывает необходимость увеличения размеров пазов и всего двигателя по сравнению с односкоростным той же мощности.

Второй способ изменения числа полюсов основан на изменении направлений магнитных потоков в машине путем переключения схемы обмотки. На рис. 98, *а* на поперечном сечении машины с $2p = 2$ условно показано положение двух катушечных групп (*1* и *4*), принадлежащих одной фазе в двухполюсной обмотке. Стрелками отмечено направление магнитных силовых линий потока машины. На схеме соединения катушечных групп этой фазы также стрелками отмечено направление обтекания их током. Причем направление стрелки над катушечной группой вправо (1-я катушечная группа) соответствует направлению силовых линий потока от центра, а влево (4-я катушечная группа) — к центру. На рис 98, *б* такое же построение проделано для четырехполюсной машины, одной фазе обмотки которой принадлежат 1, 4, 7 и 10-я катушечные группы. При встречном включении четырех катушечных групп, т. е. при принятой в обычных двухслойных обмотках схеме, магнитное поле обмотки образует четыре полюса: два одной и два другой полярности. Такую же картину поля можно получить и при двух катушках в одной фазе обмотки, если их вклю-

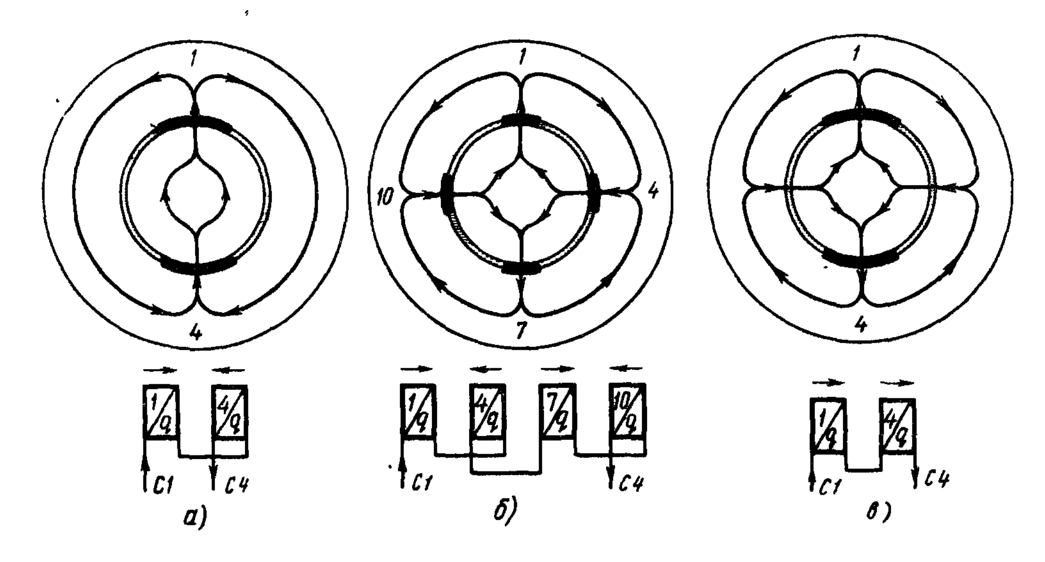


Рис. 98. Направление потоков в магнитопроводе и условные схемы обмоток машин:
а – с двумя катушечными группами при $2p = 2$, *б* – с четырьмя катушечными группами при $2p = 4$, *в* – с двумя катушечными группами при $2p = 4$

чить не встречно, а согласно, как показано на рис. 98, *в*. Сравнив между собой направления потоков и схемы обмоток, видим, что изменение направления тока в одной катушечной группе фазы двухполюсной обмотки приводит к увеличению числа полюсов с двух до четырех, т. е. в два раза. Если таким же образом изменить схему соединений двух (4-ю и 10-ю или 1-ю и 7-ю) катушечных групп четырехполюсной машины, то распределение потока будет такое же, как в машине с $2p = 8$. Таким образом, изменение направления включения половины катушечных групп в схеме двухслойной обмотки приводит к увеличению числа полюсов машины в два раза. На этом принципе основаны все двухскоростные обмотки. В них делают дополнительные отводы, с помощью которых меняют направление тока в половине катушечных групп каждой фазы, удваивая число полюсов.

Требования к двухскоростному двигателю зависят от условий работы соединенного с ним механизма. Момент, который необходим для работы механизма, может быть постоянен при различных скоростях или уменьшаться с увеличением скорости. С постоянным моментом должны работать, например, двигатели компрессорных установок, а от двигателей, приводящих во вращение металлорежущие станки, при понижении скорости требуется увеличить момент и, наоборот, с повышением скорости момент может быть уменьшен. В первом случае переход на бо́льшую частоту вращения двигателя при постоянном моменте ($M = \text{const}$) требует увеличения мощности двигателя. Во втором случае мощность двигателя не меняется ($P_2 = \text{const}$). Если необходимо сохранить постоянный момент, то обмотка при переключении на меньшее число полюсов соединяется в две параллельные ветви ($a = 2$), так как мощность двигателя возрастает, а на большее число полюсов соединяется последовательно ($a = 1$). Если же мощность одинакова на обеих частотах вращения, то обмотка при переключении на меньшее число полюсов соединяется с $a = 1$, а на большее — с $a = 2$, так как с уменьшением частоты вращения должен быть увеличен момент на валу.

Выводы обмотки многоскоростных машин имеют общепринятые обозначения (см. табл. 2), но перед ними ставится цифра, указывающая число полюсов, которое будет в обмотке при подсоединении этих выводов к сети. Например, к коробке выводов двухскоростной машины подводится шесть концов: от вершин треугольника *4C1*, *4C2* и *4C3* и из средних точек фаз *2C1*, *2C2*, *2C3* (рис. 99, *а*). Для работы

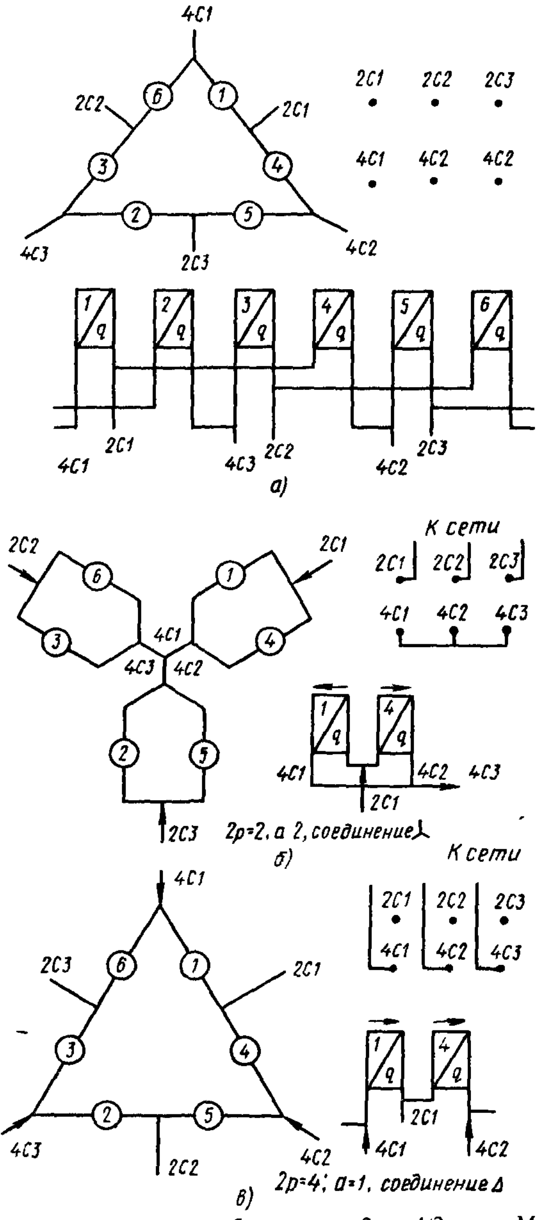


Рис 99 Схема включения обмотки на $2p = 4/2$ при $M = \text{const}$
а – соединения внутри машины, *б* – включение обмотки на $2p = 2$ при $a = 2$, *в* – включение обмотки на $2p = 4$ при $a = 1$

машины с $2p = 2$ выводы *4C1*, *4C2* и *4C3* замыкаются, а выводы *2C1*, *2C2* и *2C3* включаются в сеть (рис 99, *б*) Полученная схема соединения обмотки – звезда, в которой $2p = 2$ и $a = 2$ В каждой фазе включены параллельно две катушечные группы, имеющие разную полярность. Концы фаз замыкаются нулевой шиной Для изменения числа полюсов машины с $2p = 2$ на $2p = 4$ (рис. 99, *в*) к сети подключаются выводы *4C1*, *4C2* и *4C3* Выводные концы *2C1*, *2C2* и *2C3* остаются разомкнутыми Обмотка соединяется в треугольник с $a = 1$ По сравнению со схемой включения на $2p = 2$ полярность 1-й катушечной группы изменилась на обратную, а 4-й – осталась прежней Так же изменена полярность половины всех катушечных групп других фаз Число полюсов машины удвоилось и равно $2p = 4$ (ср с рис 99, *б*) При обеих частотах вращения двигатель может работать с одинаковым моментом на валу (M = const).

На рис 100 показана схема машины обмотки на $2p = 4/8$, рассчитанной для работы при постоянной мощности На высшей частоте вращения ($2p = 4$, $n_1 = 1500$ об/мин) эта обмотка соединяется в треугольник при $a = 1$, а на низшей ($2p = 8$, $n_1 = 750$ об/мин) – в звезду при $a = 2$ Катушечные группы каждой фазы разделены на две части, которые при включении на $2p = 4$ соединяются встречно, например, группы 1, 7-я и 4, 10-я в 1-й фазе (рис 100, *б*) При этом число полюсов равно числу катушечных групп в фазе, как и при обычной двухслойной об-

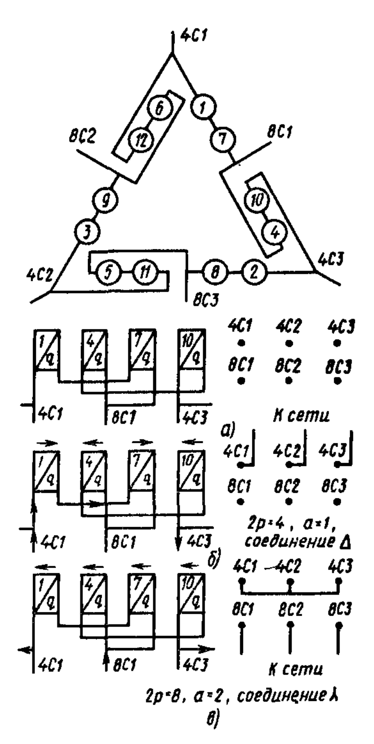


Рис 100 Схемы включения обмотки на $2p = 4/8$ при P = const

а – соединения внутри машины, *б* – включение обмотки на $2p = 4$ при $a = 1$ *в* – включение обмотки на $2p = 8$ при $a = 2$

мотке. При включении на $2p = 8$ (рис. 100, *в*) полярность половины катушечных групп фаз меняется. Теперь все катушечные группы имеют одно и то же направление обтекания током. Это направление для 1-й фазы показано стрелками на условной схеме.

Переключением схемы соединения катушечных групп можно изменить число полюсов обмотки только в два раза. Катушки обмотки и для большего и для меньшего числа полюсов остаются одни и те же. Поэтому их ширину делают такой, чтобы при большем числе полюсов шаг обмотки по пазам $y = \beta\tau$ был несколько больше полюсного деления ($\beta > 1$), а при меньшем числе полюсов – меньше полюсного деления ($\beta < 1$).

Для получения трех или четырех ступеней регулирования в пазы укладывают две независимые обмотки, одну из которых или обе делают полюснопереключаемые. Например, в двигателях на $2p = 4/6/8$ уложены две обмотки: одна на $2p = 6$, другая с переключением числа полюсов $2p = 4/8$; в двигателях с $2p = 6/8/12/16$ также уложены две обмотки. В каждой из них предусмотрена возможность переключения числа полюсов в одной с $2p = 6$ на $2p = 12$, в другой с $2p = 8$ на $2p = 16$.

§ 33. УКЛАДКА ВСЫПНОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ОБМОТКИ

Перед укладкой всыпной двухслойной обмотки вручную статор подготовляют к укладке обмотки и устанавливают пазовые короба так же, как и при однослойной обмотке. Все катушки обычных двухслойных обмоток имеют одинаковые размеры. Катушечные группы в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу содержат одинаковое число катушек, поэтому безразлично, с какой катушечной группы начинать укладку обмотки.

В обмотках с дробным числом q катушечные группы укладывают строго в последовательности, указанной в схеме обмотки, т. е. в порядке чередования больших и малых катушечных групп, принятом для данной обмотки.

Сложность укладки двухслойных всыпных обмоток заключается в том, что одна из сторон катушек должна лежать в верхней части паза, а другая – в нижней. Поэтому первые катушки не могут быть уложены в пазы обеими сторонами. Вначале укладываются только стороны этих катушек, лежащие в нижних частях пазов. Вторые стороны катушек временно размещают над пазами, в которые они

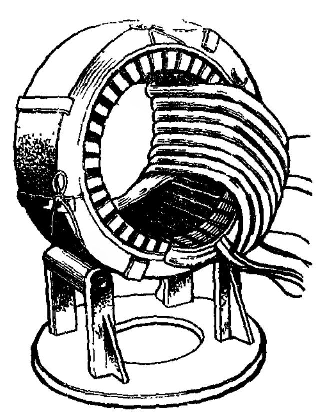


Рис 101 Укладка катушек первого шага

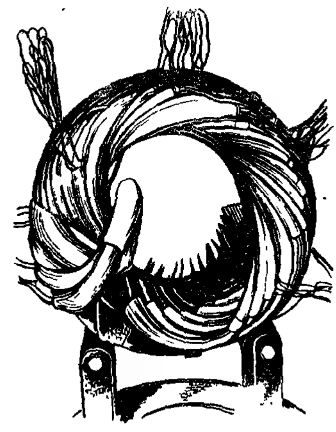


Рис. 102. Поднятые стороны замковых катушек обмотки статора

должны быть уложены (рис. 101). Число таких катушек в обмотке равно шагу, выраженному в зубцовых делениях. Их называют катушками первого шага или замковыми. После того как уложены одни стороны таких катушек, все последующие катушки обмотки устанавливаются в пазы уже окончательно обеими сторонами на предназначенные им места. Требования к укладке проводников катушек такие же, как и при укладке однослойных обмоток, т. е. проводники должны лежать в пазу параллельно, без изгибов и перекрещиваний, лобовые части катушек располагаться симметрично с обоих торцов статора и т. п.

Прежде чем начать заполнение верхней части паза, уложенные проводники нижней стороны другой катушки уплотняются с помощью подбоек и сверху на них устанавливается межслойная прокладка. Лишь после этого можно начинать укладывать в паз проводники катушки верхнего слоя. Особенно сложной операцией является укладка последних катушек, нижние стороны которых должны быть размещены в пазы под верхними сторонами катушек первого шага. Стороны замковых катушек приподнимаются (рис. 102) и закрепляются внутри статора на некоторой высоте над пазами. Эту операцию называют подъемом шага. Под них пропускают в пазы проводники нижних сторон последних катушек, уплотняют и устанавливают межслойные прокладки и после этого укладывают в верхнюю часть паза поднятые

стороны замковых катушек, т. е. как бы замыкают замок обмотки (отсюда название этих катушек).

Межслойные прокладки в пазах (см. рис. 10, *б*) должны полностью изолировать все проводники нижней стороны катушки от проводников верхнего слоя. Совершенно недопустимо, чтобы даже один проводник из одного слоя обмотки проскальзывал в другой, так как это неминуемо приведет к пробою изоляции при испытаниях или во время работы машины.

Лобовые части катушек выравниваются по мере укладки. Они должны быть строго симметричны с обоих торцов статора. После укладки последней катушки катушечной группы в лобовых частях устанавливаются межфазовые прокладки. Лобовые части следующих катушек прижимают прокладки, и они не сдвигаются с места до конца обмоточных работ. При необходимости после укладки всех катушек прокладки подбивают до упора в торцы статора, после чего подрезают по форме лобовых частей.

§ 34. ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ СТАТОРОВ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УКЛАДКИ

Технологические схемы, по которым работают современные обмоточные станки, применимы только для укладки обмоток статоров, не требующих подъема шаговых катушек, т. е. однослойных обмоток (см. § 26). В то же время область применения однослойных обмоток ограничена мощностью двигателей 12–15 кВт. При большей мощности, как правило, применяют двухслойную обмотку, так как схема позволяет выполнить укорочение шага, что улучшает характеристики двигателей. Чтобы расширить область применения механизированных способов укладки обмоток, в последние годы были разработаны новые симметричные схемы обмоток статоров, которые можно укладывать в пазы без подъема шага, как однослойные, и в то же время выполнять их с укорочением шага, как двухслойные. К наиболее распространенным типам таких обмоток относятся одно-двухслойные обмотки и двухслойные концентрические.

Одно-двухслойная обмотка (рис. 103). Одно-двухслойная обмотка представляет собой сочетание однослойной и двухслойной. В обычной двухслойной обмотке, выполненной с укорочением шага (см. рис. 89), в некоторых пазах располагаются стороны катушек, принадлежащие одной

и той же фазе, а в других – стороны катушек, принадлежащих разным фазам. Количество таких пазов на полюсном делении зависит от принятого укорочения шага. В одно-двухслойной обмотке в пазах, в которых при обычной двухслойной обмотке лежат стороны катушек одной и той же фазы, располагаются однослойные большие катушки с двойным числом витков (пазы *1*, *5*, *8* и другие на рис. 103), а в остальных пазах располагаются в два слоя малые катушки с одинарным числом витков. Обмотка выполняется концентрическими катушками без подъема шага. Определенная последовательность укладки больших и малых катушек позволяет выполнить обмотку на обмоточных станках совмещенным или раздельным способом. В каждой фазе оказывается одинаковое число больших и малых катушек, обе стороны которых лежат только на дне пазов или только в верхних слоях. Поэтому сопротивления всех фаз обмотки получаются одинаковыми и обмотки симметричными. Расчетное укорочение шага одно-двухслойной обмотки при наиболее часто встречающихся в двигателях общего применения числах пазов на полюс и фазу $q = 3$ или $q = 4$ составляет соответственно $\beta \approx 0{,}89$ и $\beta \approx 0{,}83$, т. е. примерно такое же значение, как и в обычных двухслойных обмотках с укорочением шага. Это позволяет применять одно-двухслойные обмотки в двигателях мощностью более 12–15 кВт и использовать для них механизированные способы укладки.

Двухслойная концентрическая обмотка. Двухслойная концентрическая обмотка выполняется из концентрических катушек (рис. 104) и отличается от обычной двухслойной обмотки с тем же числом q соединениями в лобовых частях и шагом катушек. Рассмотрим, как можно перейти от схемы обычной двухслойной обмотки с укороченным шагом (см. рис. 89) к двухслойной концентрической (см. рис. 104).

Двухслойная концентрическая обмотка состоит из концентрических катушек с разными шагами. Шаг наибольшей катушки в катушечной группе, например катушки, стороны которой лежат в пазах *1* и *7*, равен расстоянию между левой стороной первой катушки в катушечной группе обычной обмотки и правой стороной последней катушки той же группы (на рис. 89 это также пазы *1* и *7*). Шаги внутренних катушек катушечной группы уменьшаются на два зубцовых деления каждый, как в обычной обмотке с концентрическими катушками. Определенная последовательность укладки катушечных групп позволяет уложить всю обмотку

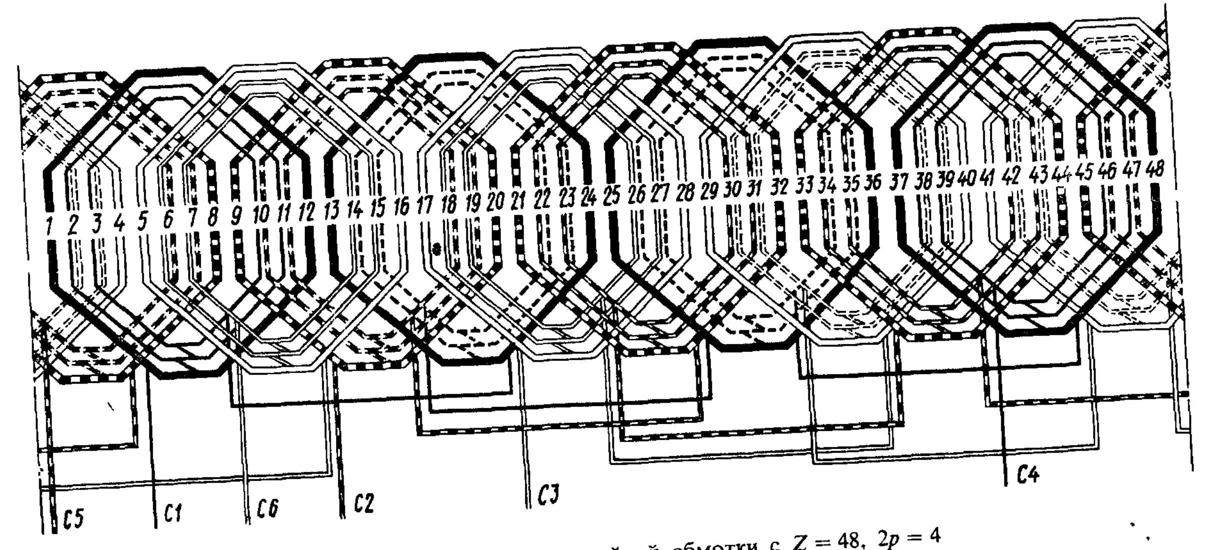


Рис 103 Схема одно-двухслойной обмотки с $Z = 48$, $2p = 4$

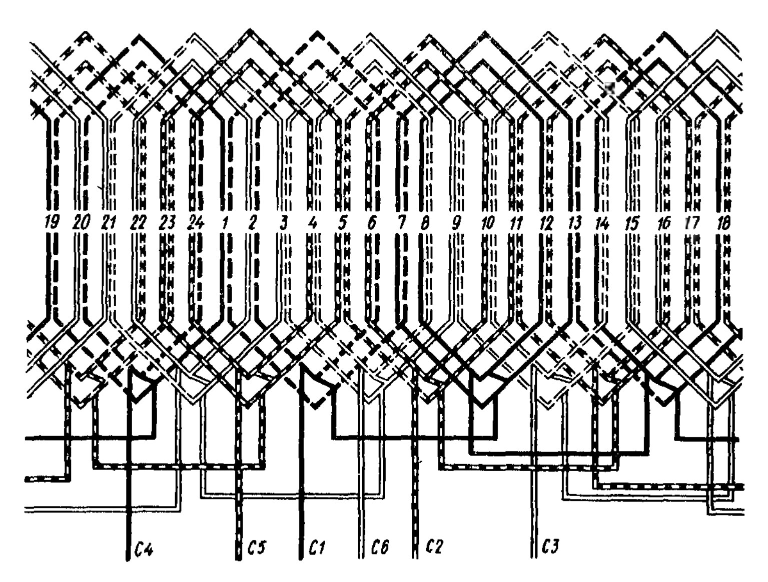


Рис 104 Схема двухслойной концентрической обмотки с $Z=24$, $2p=4$

на обмоточном станке без подъема шага. Количество сторон катушек, лежащих в нижнем и верхнем слоях паза, для каждой из фаз будет одинаково, что обеспечивает симметрию обмотки. Обмоточный коэффициент двухслойной концентрической обмотки остается таким же, как и в обычной двухслойной обмотке с укороченным шагом, поэтому ее можно применять для машин большей мощности, чем однослойную обмотку.

§ 35. УКЛАДКА ОБМОТКИ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

Катушки обмотки из прямоугольного провода укладываются в открытые или полуоткрытые пазы с параллельными стенками (см. рис. 11, 12) Полуоткрытые пазы выполняют в низковольтных машинах мощностью более 100 кВт Конструкция пазовой изоляции такая же, как при всыпных обмотках, т е. изолируются не катушки, а пазы машины. В пазы укладывают пазовые короба, состоящие из двух или трех слоев изоляционного материала.

После предварительного осмотра и подготовки статора к укладке обмотки в его пазы устанавливают комплект

пазовых коробов и прокладок согласно чертежу обмотки. Катушки поступают на обмоточный участок скомплектованными по две. Так же они должны лежать и в пазу машины. Развязав первую пару катушек, обмотчик отделяет катушку, нижняя сторона которой находится снаружи, и располагает ее на внутренней поверхности статора вдоль пазов, в которых должны лежать ее стороны. После этого вкладывает нижнюю сторону первой катушки в паз и аккуратно, чтобы не повредить изоляции, пропускает ее через шлиц паза. Кромки шлица должны быть закрыты изогнутыми под углом изоляционными вкладками или выступающими из паза сторонами изоляционного короба. Верхняя сторона катушки также опускается в паз. После этого нижняя сторона осаживается на дно паза и сдвигается в сторону от шлица паза (рис. 105, *а*). Другая сторона катушки остается в верхней части паза. Так же как и в двухслойной всыпной обмотке, эта сторона катушки может быть размещена в пазу окончательно только на заключительной стадии укладки при закрывании замка. Поэтому в начале укладки верхние стороны шаговых катушек помещают в пазы временно. Их можно вообще не опускать в пазы, но в этом случае они мешают укладке других катушек.

После того как первая катушка установлена, в паз опускают нижнюю сторону второй катушки из той же пары и осаживают ее на дно так, чтобы она плотно легла рядом со стороной первой катушки (рис. 105, *б*). Верхняя сторона второй катушки также помещается в паз временно. Лобовые части уложенных катушек выравнивают, чтобы они плотно

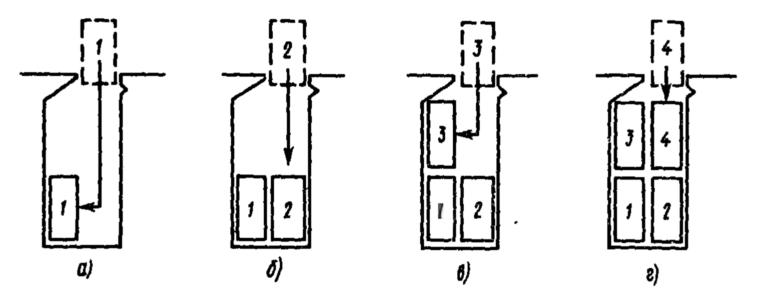


Рис. 105. Последовательность укладки подразделенных катушек в пазы:

а – *г* – фазы заполнения паза, *1*, *2*, *3*, *4* – очередность укладки в пазы катушечных сторон

соприкасались одна с другой на всем протяжении и располагались симметрично по обеим торцам статора. После этого развязывают следующую пару катушек и в том же порядке укладывают в пазы. Так продолжают до тех пор, пока не уложены все катушки первого шага, т. е. столько катушек, сколько пазовых делений в шаге обмотки. Следующие за ними катушки должны быть уложены в пазы окончательно обеими сторонами.

Поэтому перед укладкой очередной катушки, верхняя сторона которой помещается в уже наполовину заполненный паз, нижние стороны находящихся в ней катушек окончательно выравниваются; для этого по ним ударяют ручником через осадочную доску, и на них устанавливают прокладку – изоляцию между слоями обмоток. Материал изоляции и его толщина указаны в чертеже, а ширина прокладки должна быть точно равна ширине свободной от корпусной изоляции части паза, чтобы между верхними и нижними сторонами катушек не оставалось неизолированного промежутка и в то же время прокладка не коробилась (коробление может произойти, если она будет чрезмерно широкой). После установки прокладки укладывают очередную катушку. Ее нижняя сторона, так же как и в первых катушках, осаживается на дно паза и сдвигается в стороны от шлица паза, а верхняя сторона одновременно сдвигается в ту же сторону, но в верхнем слое первого паза, как показано на рис. 105, *в*. Далее в те же пазы устанавливается следующая катушка из той же пары, что и предыдущая. Ее нижняя сторона занимает положение *2*, а верхняя – положение *4* (рис. 105, *г*).

Все стороны катушек, лежащих в заполненных пазах, после выправления их лобовых частей уплотняют, выступающие из паза кромки изоляции подрезают фигурными ножами, края корпусной изоляции подворачивают в паз, на них сверху устанавливают прокладки, указанные в чертеже, и паз заклинивают. Таким же образом укладываются все остальные пары катушек до пазов, верхние стороны которых заняты сторонами катушек первого шага. С этого момента начинается заключительная операция укладки обмотки, связанная с подъемом шага.

Верхние стороны первых шаговых катушек должны быть вынуты из пазов и приподняты над ними, чтобы можно было уложить нижние стороны последних катушек. При подъеме верхних сторон несколько деформируются лобовые части катушек, поэтому поднимать их следует осторожно,

плавно, без резких рывков. Поднятые стороны замковых катушек отгибают к центру статора и подвязывают к установленным внутри статора деревянным рейкам. В освобожденные таким образом пазы устанавливают нижние стороны последних катушек, после чего поочередно опускают и укладывают в пазы поднятые стороны замковых катушек и последние пазы заклинивают. Далее приступают к креплению лобовых частей обмотки, которые плотно связывают между собой и крепят к бандажным кольцам*.

Корпусная изоляция катушек, укладываемых в открытые пазы, может быть гильзовой или непрерывной. Последовательность укладки катушек такая же, как и при полуоткрытых пазах, но в каждом открытом пазу размещаются не четыре, а только две стороны катушки: одна в верхнем и другая в нижнем слоях паза.

Пазы не изолируют, так как корпусная изоляция находится на катушках. В некоторых случаях она предохраняется тонкими коробами из изоляционного материала. На дно пазов устанавливают прокладки. В крупных машинах обмотки укладывают два обмотчика, находящихся с обоих торцов статора. Это позволяет опускать катушки в пазы равномерно по всей длине статора.

Вначале укладывают катушки первого шага. Обе стороны катушки вводят в пазы одновременно, после чего нижнюю сторону осаживают с помощью осадочной доски на дно паза, а верхнюю временно оставляют в верхней части паза. После укладки всех катушек первого шага последующие катушки устанавливают в пазы окончательно. На нижние стороны уложенных катушек в пазовой части помещают прокладки между слоями. Заполненные сторонами катушек пазы заклиниваются. Перед укладкой катушек последнего шага верхние стороны замковых катушек поднимают из пазов и укрепляют над ними. Эта операция затруднена из-за большой жесткости катушек, поэтому при ее выполнении от обмотчиков требуется особая аккуратность, так как чрезмерный или резкий изгиб лобовой части катушки может привести к нарушению изоляции. Лобовые части катушек увязываются между собой и крепятся к бандажным кольцам по мере укладки в пазы.

Укладка обмотки с компаундированной изоляцией имеет свои особенности. Изоляцию высоковольтных обмоток совре-

---

* Способы крепления лобовых частей катушек из прямоугольного провода рассмотрены в гл XII «Крепление и отделка обмоток»

менных машин пропитывают либо битумными компаундами, либо компаундами на основе эпоксидных смол. Битумные компаунды термопластичны, т. е. они размягчаются при нагреве и застывают при охлаждении. Эпоксидные компаунды термореактивны. Они затвердевают и после этого не размягчаются. Непрерывная изоляция, пропитанная в битумных компаундах, в холодном состоянии твердая и хрупкая. При нагреве она становится мягкой и пластичной. Поэтому катушки с пропитанной в битумных компаундах изоляцией перед укладкой в пазы обязательно нагревают до температуры размягчения компаунда. Для этого непосредственно у рабочего места, где производится укладка обмотки, размещают нагревательные печи – термостаты с температурой нагрева 120–130 °С. В них загружают несколько катушек, предназначенных к укладке. Разогретую катушку вынимают и укладывают в пазы, а на ее место помещают следующую катушку. За короткое время, пока катушка еще не остыла, ее нужно уложить в пазы, заклинить, поставить на постоянное место ее лобовые части, отрихтовать и укрепить их, подвязав к бандажным кольцам. Остывшую катушку уже нельзя ни перемещать в пазах, ни изгибать ее лобовые части, так как изоляция может потрескаться.

Особая сложность возникает при подъеме шага и укладке шаговых катушек. К этому моменту работы первые катушки уже остывают и их изоляция теряет гибкость. В то же время уложенные в статор катушки нельзя поместить в нагревательную печь. Замковые катушки разогревают, пропуская по ним ток от однофазного трансформатора или постоянный ток от преобразователя. В любом случае источник тока может быть рассчитан на небольшое напряжение. Соединяя последовательно несколько катушек, подбирают напряжение источника тока таким, чтобы плотность тока в проводниках катушек была 6–7 А/мм^2 (не выше 8 А/мм^2). В этом случае процесс нагрева катушек длится около 30–40 мин. Нагрев контролируется по температуре наружного слоя изоляции. Она должна быть 75–90 °С. Температура внутренних слоев изоляции будет выше и компаунд размягчится, после чего можно отгибать верхние стороны замковых катушек и заканчивать укладку всей обмотки.

Изоляцию обмоток, пропитанную в эпоксидных компаундах, нельзя размягчать нагреванием. В сравнительно небольших машинах катушки такой обмотки укладывают в пазы до пропитки, а пропитывают уже после укладки, погружая в компаунд весь обмотанный статор. Технология укладки

при этом такая же, как и обмоток с гильзовой изоляцией. В более крупных машинах катушки обмотки пропитывают в эпоксидном компаунде до укладки в пазы и подсушивают, но не запекают. После подсыхания изоляции на поверхности катушек их укладывают в пазы машины, закрепляют пазовые и лобовые части и лишь после этого запекают, так как эпоксидный компаунд затвердевает только при высокой температуре. Запечку производят либо в печи, помещая в нее весь статор, либо нагревают обмотку током до заданной температуры.

§ 36. ОСОБЕННОСТИ УКЛАДКИ ОБМОТОК СТАТОРА КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Последовательность укладки в пазы катушек обмотки крупных электрических машин такая же, как и машин средней мощности. Но с увеличением мощности и размеров машин возрастает поперечное сечение катушек и увеличивается их механическая жесткость. Усилия, необходимые для установки в пазы катушек, отгиба и рихтовки их лобовых частей, возрастают. В то же время изоляция больших катушек имеет такую же механическую прочность, как и малых. Сильные и резкие удары могут привести ее в негодность. Поэтому при установке обмоток крупных машин часто используют различные домкраты, с помощью которых можно создать сильное равномерное давление на всю пазовую часть катушки и не повредить ее изоляцию. Домкрат упирают в установленную в статоре перекладину и создают сильное давление на прямолинейную пазовую часть катушки через вставленную в паз осадочную доску. Для полного осаживания пазовой катушки в паз на место постоянного клина устанавливают стальную пластину, ширина которой должна быть несколько меньше, чем у постоянного клина, так, чтобы она свободно перемещалась в клиновых выемках паза. На верхнюю часть помещенной в паз катушечной стороны укладывают предохранительную прокладку и с двух сторон статора забивают длинные деревянные или текстолитовые осадочные клинья со скосами, направленными навстречу друг другу. При их сдвигании навстречу друг другу осадочные клинья упираются сверху в стальную пластину, создают равномерное давление на всю верхнюю поверхность катушки и осаживают ее на дно паза. Лобовые части отгибаются в нужное положение также с помощью домкрата (рис. 106), упирающегося одной стороной в дере-

вянную планку, приложенную к лобовой части катушки, а другой – в сталь статора.

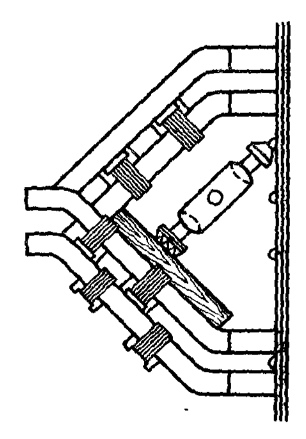


Рис 106 Осадка лобовых частей с помощью домкрата

Обмотка статоров современных турбо- и гидрогенераторов, как правило, выполняется не катушечной, а стержневой. При этом отпадает необходимость в подъеме шага и укладке замковых катушек. Вначале укладывают все стержни нижнего слоя, последовательно рихтуя и привязывая к бандажным кольцам их лобовые части, после чего, установив прокладку между слоями, укладывают стержни верхнего слоя. Масса стержня обмотки крупного турбогенератора или гидрогенератора достигает 100 кг и более, поэтому укладка стержней в пазы выполняется несколькими обмотчиками.

Статоры тихоходных вертикальных гидрогенераторов делают разъемными. Обычно они разнимаются на четыре или шесть сегментов (рис. 107). Укладка стержней в пазы сегментов облегчена тем, что сегменты располагаются на обмоточном участке пазами вверх и у обмотчиков имеется много свободного места для работы. Стержни укладывают не во все пазы сегментов: несколько пазов с обоих торцов сегмента оставляют свободными. Число таких пазов с каждой стороны равно примерно половине шага обмотки. Это делают для того, чтобы во время транспортировки обмотанных сегментов к месту установки гидрогенератора лобовые части уложенных стержней не выступали за габариты сегмента и не повреждались. В оставшиеся свободными пазы стержни устанавливают после сборки статора на гидроэлектростанции.

Внутренние диаметры статоров турбогенераторов относительно небольшие. Даже в очень мощных машинах они лишь немного больше метра, что очень затрудняет укладку статорной обмотки, каждый стержень которой имеет большую массу и большую длину отогнутых лобовых частей. Статорную обмотку турбогенераторов укладывает бригада обмотчиков. При этом используют все описанные выше способы для равномерной осадки стержней на дно

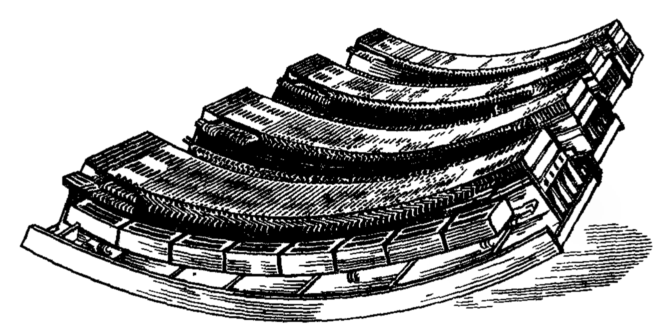


Рис 107 Сегменты статора гидрогенератора

пазов и рихтовки лобовых частей (осадочные клинья, домкраты и т п) Лобовые части стержней, как правило, крепятся с каждой стороны статора двумя или тремя бандажными кольцами, которые, в свою очередь, прикреплены на стойках к нажимным плитам статора

Стержни турбо- и гидрогенераторов между собой и схему обмотки соединяют либо пайкой головок стержней встык серебряными припоями типа ПСР, либо с помощью наконечников на головках стержней с последующей пропайкой

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Чем отличается двухслойная обмотка от однослойной?

2 Как располагают начала фаз в обмотке статора?

3 Чем отличаются друг от друга обмотки статора, схемы которых показаны на рис 88 и 89?

4 Можно ли обмотку, схема которой изображена на рис 89, соединить в четыре параллельных ветви?

5 Во сколько параллельных ветвей можно соединить обмотку статора с числом полюсов, равным восьми?

6 Чем различаются обмотки с дробными и целыми числами пазов на полюс и фазу?

7 Что такое период чередования катушечных групп?

8 Сколько больших и малых катушечных групп будет в периоде чередования обмотки с $q = 3^1/_2$?

9 Можно ли обмотку с дробным числом q соединить в несколько параллельных ветвей?

10 Определите чередование катушечных групп в периоде для обмотки статора с $Z = 72$ при $2p = 10$

11 Какими способами можно изменить частоту вращения асинхронного двигателя?

12 Как можно изменить число полюсов машины, изменяя полярность катушечных групп обмотки?

13 Какую обмотку называют одно-двухслойной?

14 Зачем нужно поднимать стороны шаговых катушек во время укладки двухслойной обмотки?

15 В какой последовательности устанавливают катушки в полуоткрытые пазы статора?

ГЛАВА X
СТЕРЖНЕВЫЕ ОБМОТКИ РОТОРОВ

§ 37. СХЕМЫ ОБМОТОК ФАЗНОГО РОТОРА

Обмотки фазных роторов асинхронных двигателей мощностью более 70–80 кВт, как правило, выполняют стержневыми В фазных роторах современных асинхронных двигателей почти всегда применяют двухслойные волновые обмотки, так как их лобовые части требуют меньше изгибов, чем однослойные, а в волновых обмотках меньше межгрупповых соединений, чем в петлевых той же полюсности, что особенно важно, учитывая большое поперечное сечение стержней обмотки

Закономерность соединения схемы стержневых волновых обмоток рассмотрим на конкретном примере Составим схему волновой стержневой обмотки фазного ротора с $Z = 24$ и $2p = 4$ На рис 108, *а* показаны 24 линии пазов, в которых располагаются стержни верхнего (сплошные линии) и нижнего (пунктирные линии) слоев обмотки Разметим пазы так же, как в схемах двухслойных обмоток статора, т е распределим все пазы по полюсным делениям и обозначим фазы обмотки Полюсное деление ротора содержит $Z_2/p = 24/4 = 6$ пазовых делений Число пазов на полюс и фазу $q_2 = Z_2/2pm = 24/4 \cdot 3 = 2$ Для всех стержней фазы *А* отметим стрелками направление мгновенных значений токов Оно меняется при переходе от одного полюсного деления к другому Построение схемы обмотки начнем, приняв за начало фазы *А* верхний стержень, лежащий в первом пазу (рис 108, *б*) Одновременно с вычерчиванием схемы обмотки будем заполнять таблицу соединений с указанием номеров пазов и последовательности шагов, как показано на рис 108, *в* Обмотку выполняют с диаметральным шагом $y = \tau_2 = 6$ пазовым делениям Обмотка двухслойная, поэтому верхний стержень, лежащий в первом пазу, должен быть соединен с нижним стержнем, лежащим в 7-м $(1 + y) = (1 + 6)$ пазу Следующим шагом нижний стержень 7-го паза соединяется с верхним стержнем, лежащим в 13-м $(7 + 6)$ пазу Проделав таким образом $2p - 1 = 3$ шага

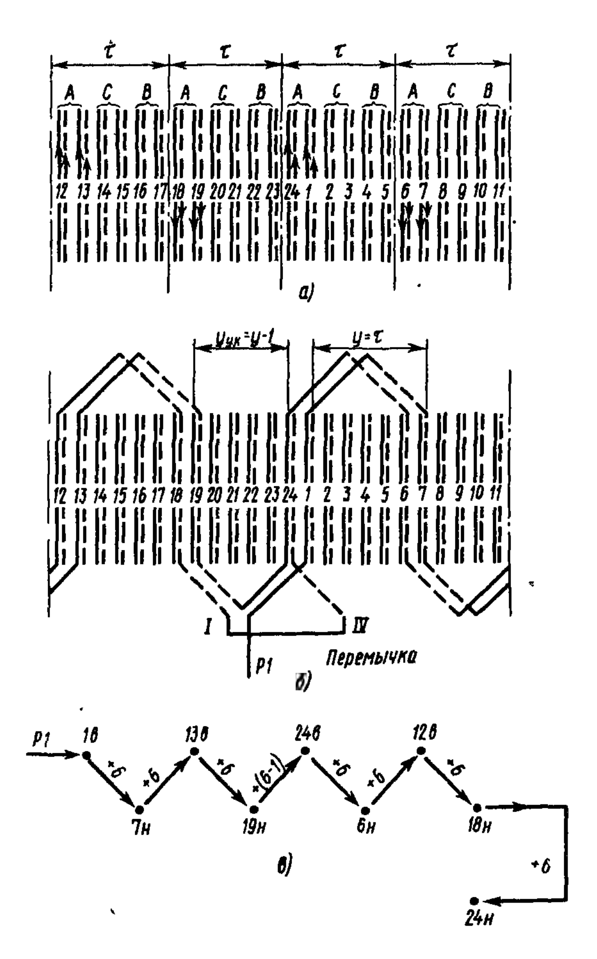


Рис 108 Построение схемы стержневой волновой обмотки фазного ротора.

а – распределение пазов по фазам, *б* – соединение стержней первой половины фазы, *в* – последовательность соединения стержней

из 1в в 7н, из 7н в 13в, из 13в в 19н, убедимся, что при следующем таком же шаге стержень, лежащий в нижнем слое 19-го паза, должен быть соединен со стержнем, взятым за начало фазы, лежащим в верхнем слое 1-го паза, т. е. обмотка замкнется сама на себя. Чтобы этого не произошло, следующий шаг изменяют на одно зубцовое деле-

ние – укорачивают или удлиняют, т. е. делают его равным $(y+1)$ или $(y-1)$. Чаще применяют укороченный шаг, так как он приводит к некоторой экономии меди. Кроме того, в обмотках с удлиненным шагом появляются дополнительные перекрещивания лобовых частей стержней верхнего и нижнего слоев обмотки у выхода их из пазов.

Первый обход обмотки по всей окружности ротора завершается укороченным (или удлиненным) шагом, после чего соединение продолжают в той же последовательности с диаметральными шагами, изменяя их в конце каждого из обходов. После q_2 таких обходов (в нашем случае после двух обходов, так как $q_2 = 2$) укорачивать (или удлинять) последний шаг уже нельзя, так как это приведет к соединению обмотки фазы *A* со стержнями соседней фазы (18н + 6 – 1 = 23в – принадлежит фазе *B*). К этому моменту соединена половина всех стержней фазы *A* и в каждом пазу этой фазы находится только один верхний или один нижний стержень (см. рис. 108, *б*). Для заполнения оставшихся после первых q_2 обходов половин пазов фазы последний стержень, на котором закончился обход (на нашей схеме – нижний стержень 18-го паза), соединяют перемычкой со стержнем, занимающим такое же положение в пазу на расстоянии шага в направлении обхода. В нашем примере нижний стержень 18-го паза соединяется с нижним стержнем 24-го (18 + 6) паза. Дальнейшие соединения продолжают в той же последовательности, но в направлении, обратном принятому первоначально. После q_2 обходов в обратном направлении построение схемы одной фазы обмотки заканчивается. Схема соединения фазы *A* изображена на рис. 109, а всех фаз обмотки ротора – на рис. 110. По схеме рис. 110 можно проследить основные закономерности, характерные для стержневых волновых обмоток роторов. Начала фаз располагаются в 1,9 и 17-м пазах, т. е. через $2q_2p = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ зубцовых делений. Такое расстояние между началами фаз обеспечивает и электрическую и геометрическую симметрию обмотки. Электрический угол между началами фаз кратен 120 (он равен $2p \cdot 60° = 2 \cdot 2 \cdot 60 = 240$ эл. град), а геометрический угол равен 120°, т. е. начала фаз расположены симметрично по окружности ротора.

Каждая фаза обмотки имеет только одну перемычку между катушечными группами независимо от числа полюсов машины. Напомним, что в петлевых обмотках таких перемычек будет $(2p-1)$ в каждой фазе (см., например, рис. 88 или 89). В этом ясно видно преимущество волновых схем,

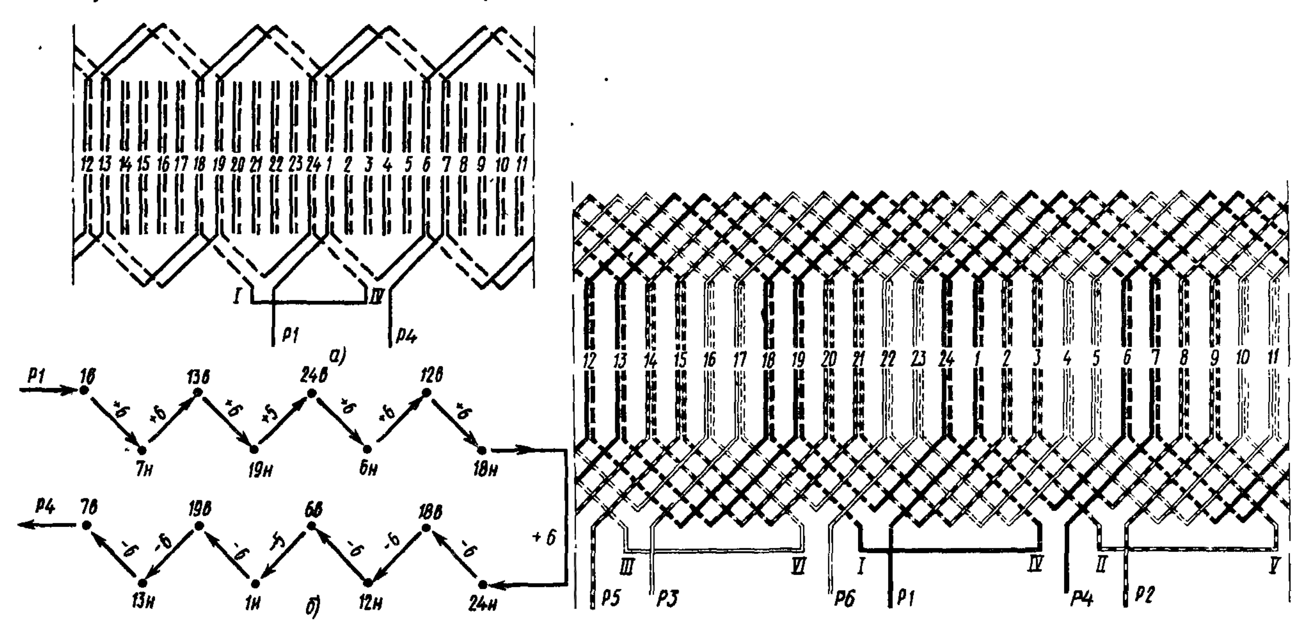


Рис. 109 Схема соединения стержней одной фазы волновой обмотки ротора (*а*) и последовательность их соединения (*б*)

Рис 110 Схема соединения стержней всех фаз стержневой волновой обмотки ротора, с укороченными переходами с $Z=24$, $2p=4$

особенно для многополюсных машин. Так, например, в каждой фазе петлевой обмотки с $2p = 12$ будет по 11 перемычек между катушечными группами, а в фазе стержневой волновой — только одна.

При симметрично расположенных началах фаз обмотки также симметрично по окружности ротора располагаются концы фаз (*Р4* в 7-м, *Р5* в 15-м, *Р6* в 23-м пазах) и перемычки между катушечными группами, что облегчает балансировку ротора после укладки обмотки. В большинстве случаев обмотка ротора соединяется в звезду. Начала фаз обмотки ротора (*Р1*, *Р2*, *Р3*) соединяются с контактными кольцами, а концы фаз (*Р4*, *Р5*, *Р6*) — между собой кольцевой перемычкой.

Как уже говорилось, обмотка может быть выполнена и с удлиненными шагами в конце каждого обхода. Ее схема строится так же, как и схема на рис. 110, но в конце обхода выполняется удлиненный шаг, равный ($y + 1$). Из-за увеличения шага несколько удлиняются лобовые части стер-

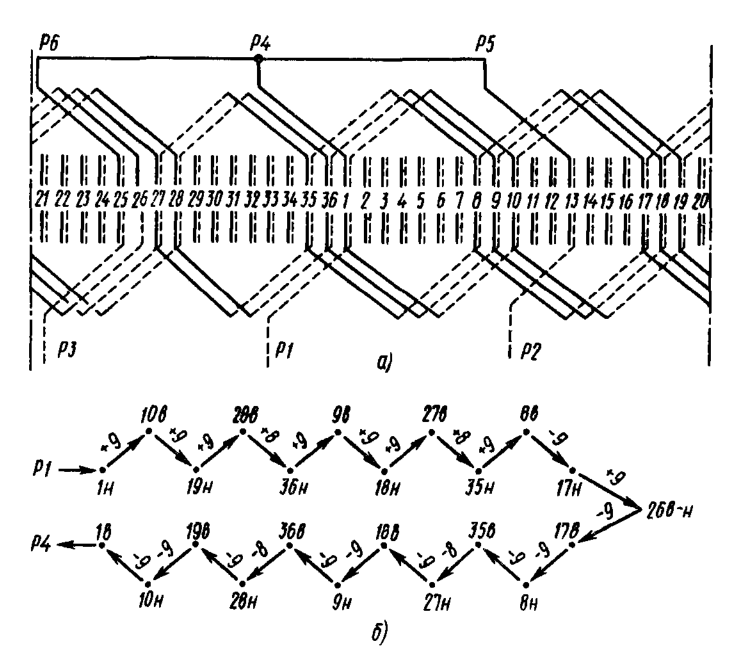


Рис 111 Схема стержневой волновой обмотки ротора с переходным стержнем с $Z = 36$, $2p = 4$ (*а*) и последовательность соединения стержней одной фазы (*б*)

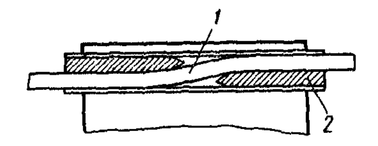


Рис 112 Переходной стержень в пазу ротора

жней, соединенных с перемычками, а у выводных стержней возникают дополнительные перекрешивания в лобовых частях.

Иногда стержневую волновую обмотку ротора делают с различными переходными шагами: при обходе первой ветви до перемычки с удлиненными, а после перемычки – с укороченными.

Встречаются также схемы обмоток фазных роторов, выполненные без перемычек (рис. 111). В таких обмотках на месте последнего при прямом обходе стержня, который в обычных схемах соединяется с перемычкой, устанавливают изогнутый переходный стержень (паз *26* на рис. 111). Половина этого стержня *1* располагается в нижней, а другая половина – в верхней части паза (рис. 112). Обе лобовые части переходного стержня отгибаются в одну и ту же сторону, и направление обхода соединения обмоток после переходного стержня меняется на обратное, так же как и после

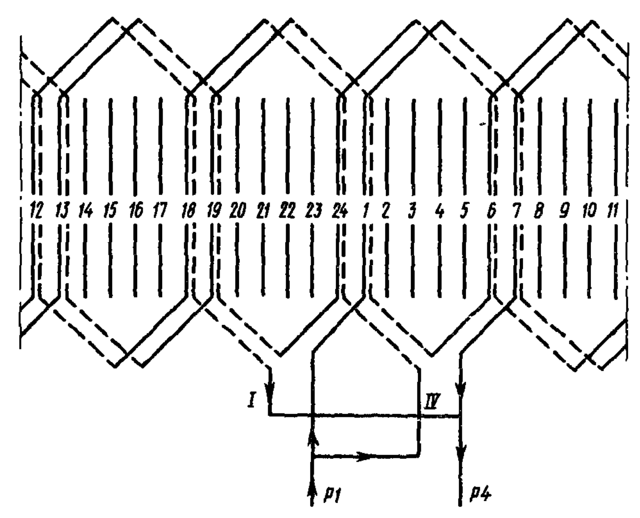


Рис 113 Соединение фазы обмотки ротора в две параллельные ветви

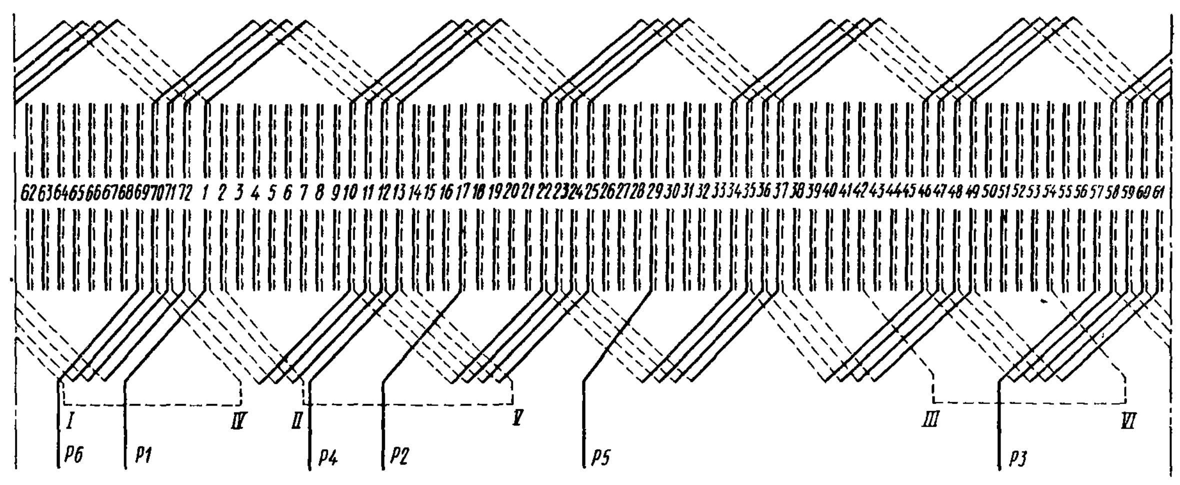


Рис 114 Схема стержневой волновой обмотки ротора с числом полюсов, кратным трем, с $Z = 72$, $2p = 6$

перемычки. В таких схемах выводные концы последних стержней всех фаз располагаются на противоположной от начал фаз стороне ротора. Соединение стержней в них более удобно, чем в схемах с перемычками, однако обмоточные работы усложняются в связи с необходимостью добавочного закрепления переходных стержней. Пустые части пазов, в которых расположены переходные стержни, заполняются либо текстолитовыми прокладками 2, либо отрезками изолированной медной шины того же размера, что и стержни обмотки, как показано на рис. 112.

Стержневую волновую обмотку делают с одной или реже с двумя параллельными ветвями. Выполнение большего числа параллельных ветвей в лобовых частях технологически трудно и в практике применяется редко. Для получения двух параллельных ветвей перемычку между половинами фаз убирают и каждую половину обмотки соединяют с начальными и конечными выводами фаз (рис. 113).

Чтобы начала фаз в обмотке ротора располагались по окружности ротора симметрично, между ними должно заключаться $2q_2p$ пазов. Такое симметричное расположение возможно во всех роторах, число полюсов которых не кратно трем. В двигателях с числом полюсов, кратным трем ($2p = 6$, 12 и т. д.), симметричное положение выводов приходится нарушать, так как через $2q_2p$ пазов в них располагаются стержни одной и той же фазы. Начала фаз в обмотках роторов таких машин выбирают через $2q_2$ $(p-1)$ пазовых делений. Схема одной фазы обмотки с $Z = 72$, $2p = 6$ и $q = 4$ изображена на рис. 114. На этой схеме отмечено также положение начал и концов других фаз обмоток и перемычек в каждой фазе. Начала фаз взяты через $2q_2(p-1) = 2\cdot 8(3-2) = 16$ пазовых делений, т. е. в 1, 17 и 57-м пазах Перемычка первой фазы обозначена I — IV, второй — II — V, третьей — III — VI. Обмотка имеет полную электрическую симметрию, но масса обмотки распределена по окружности ротора неравномерно. Динамическая балансировка таких роторов усложняется.

§ 38. ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Стержневые волновые обмотки роторов асинхронных двигателей в большинстве случаев выполняются с целым числом пазов на полюс и фазу. Однако в многополюсных машинах иногда необходимо выполнить такое число пазов

ротора, что q_2 получается дробное Наиболее часто встречаются числа пазов на полюс и фазу со знаменателем дробности, равным 2 т. е. $q_2 = 2^1/_2$, $3^1/_2$, $4^1/_2$ и т. д. Построение схемы обмотки ротора с $q_2 = 2^1/_2$ показано на рис. 115 Первую прямую ветвь – половину каждой фазы обмотки – соединяют так же, как и при целом q_2, равном целой части дробного. В обмотке на рис 115 $q_2 = 2^1/_2$, поэтому прямую ветвь фазы соединяют так же, как для обмотки с целым $q_2 = 2$, а после перемычки при обратном обходе так же, как для обмотки с целым $q_2 = 3$. Но при дробном q_2 шаги обмотки не могут быть выполнены диаметральными Если знаменатель дробности равен 2, то диаметральный шаг $y = \tau_2 = 3q_2$ не будет выражен целым числом зубцовых делений. Поэтому прямая и обратная ветви обмотки имеют последовательно меняющиеся шаги, один из которых берется равным $y' = \tau_2 \mp 0,5$ зубцовым делениям, а следующий $y'' = \tau_2 \pm 0,5$ зубцовым

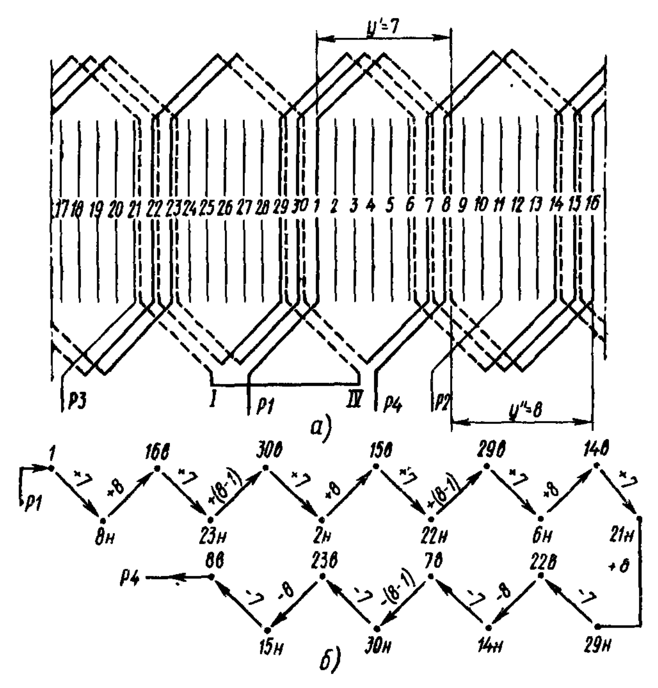


Рис 115 Схема соединения стержней волновой обмотки ротора с $Z = 30$, $2p = 4$, $q_2 = 2^1/_2$ (а) и последовательность их соединения (б)

делениям. В этих выражениях в первом случае стоит знак «$\mp$», а во втором «$\pm$». Это означает, что если первый шаг укороченный, например на схеме рис. 115, $y' = \tau_2 - 0{,}5 = 7{,}5 - 0{,}5 = 7$, то второй должен быть удлиненным: $y'' = \tau_2 + 0{,}5 = 7{,}5 + 0{,}5 = 8$. При этом шаги со стороны выводных концов обмотки и с противоположной стороны ротора получаются различными. Если со стороны выводов шаг будет укорочен по сравнению с полюсным делением, то с противоположной стороны – удлиненным, но в сумме каждая пара шагов всегда остается равной двойному полюсному делению $y' + y'' = 2\tau_2$. После соединения схемы стержни фаз оказываются расположенными по группам, каждая из которых занимает q_2 пазов (на рис. 115 – 2 целых и одну половину – верхнюю или нижнюю часть паза, т. е. $2^1/_2$ пазов на полюс и фазу).

Параллельных ветвей в стержневых волновых обмотках фазных роторов с дробным q_2 не делают, так как прямая и обратная ветви каждой фазы содержат различное число стержней и для образования параллельных ветвей требуется устанавливать дополнительные перемычки.

§ 39. ТАБЛИЦЫ ПОЛОЖЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ В ВОЛНОВЫХ ОБМОТКАХ РОТОРОВ

Не все стержни волновой обмотки фазного ротора имеют одинаковые лобовые части. Стержни нижнего и верхнего слоев различаются по направлению отгиба лобовых частей. Размеры лобовых частей начальных и конечных стержней каждой фазы и стержней, соединенных перемычками, будут отличаться от размеров лобовых частей остальных стержней обмотки. Это создает определенные трудности при укладке стержней в пазы, так как требует повышенного внимания и нарушает ритм работы: через определенное число пазов должны быть установлены стержни, имеющие другие размеры. Чтобы упростить работу по укладке, обмотчики вначале устанавливают стержни, имеющие специфические размеры идущие к перемычкам, начальные и конечные. Место каждого из таких стержней можно определить по схеме обмотки, но еще проще воспользоваться заранее составленной таблицей, в которой указаны номера пазов и положение в них стержней (в верхнем или нижнем слое паза), к которым присоединяются начала и концы фаз и перемычки. Примером может служить таблица стержневой волновой обмотки с укороченными переходными

шагами, составленная для нескольких двигателей с различными числами полюсов и пазов (табл. 7). В обмотках с целым q_2 шаги y' и y'' одинаковы. В обмотках с дробным q_2 шаги со стороны, противоположной выводам, на одно зубцовое деление меньше, чем со стороны выводов. Укороченные переходные шаги $y_{ук}$ на одно зубцовое деление меньше, чем шаги со стороны выводных концов y''. Начала фаз и концы фаз располагаются в верхних слоях пазов.

Таблица 7. **К составлению схем стержневых волновых обмоток роторов с укороченными переходами**

Число полюсов $2p$	Число пазов Z_2	Число пазов на полюс и фазу	Шаги			Номера верхних стержней						Номера нижних стержней					
						Начала фаз			Концы фаз			Начала перемычек			Концы перемычек		
			y'	y''	$y_{ук}$	P1	P2	P3	P4	P5	P6	I	II	III	IV	V	VI
4	18	1,5	4	5	4	1	7	13	5	11	17	13	1	7	18	6	12
4	24	2	6	6	5	1	9	17	7	15	23	18	2	10	24	8	16
4	30	2,5	7	8	7	1	11	21	8	18	28	21	1	11	29	9	19
4	36	3	9	9	8	1	13	25	10	22	34	26	2	14	35	11	23
4	42	3,5	10	11	10	1	15	29	11	25	39	29	1	15	40	12	26
4	48	4	12	12	11	1	17	33	13	29	45	34	2	18	46	14	30
4	54	4,5	13	14	13	1	19	37	14	32	50	37	1	19	51	15	33
4	60	5	15	15	14	1	21	41	16	36	56	42	2	22	57	17	37
6	45	2,5	7	8	7	1	11	36	8	18	43	36	1	26	44	9	34
6	54	3	9	9	8	1	13	43	10	22	52	44	2	32	53	11	41
6	63	3,5	10	11	10	1	15	50	11	25	60	50	1	36	61	12	47
6	72	4	12	12	11	1	17	57	13	29	69	58	2	42	70	14	54
6	81	4,5	13	14	13	1	19	64	14	32	77	64	1	46	78	15	60
6	90	5	15	15	14	1	21	71	16	36	86	72	2	52	87	17	67
8	72	3	9	9	8	1	25	49	10	34	58	62	14	38	71	23	47
8	84	3,5	10	11	10	1	29	57	11	39	67	71	15	43	82	26	54
8	96	4	12	12	11	1	33	65	13	45	77	82	18	50	94	30	62
8	108	4,5	13	14	13	1	37	73	14	50	86	91	19	55	105	33	69
8	120	5	15	15	14	1	41	81	16	56	96	102	22	62	117	37	77
10	60	2	6	6	5	1	21	41	7	27	47	54	14	34	60	20	40
10	75	2,5	7	8	7	1	26	51	8	33	58	66	16	41	74	24	49
10	90	3	9	9	8	1	31	61	10	40	70	80	20	50	89	29	59
10	105	3,5	10	11	10	1	36	71	11	46	81	92	22	57	103	33	68
12	72	2	6	6	5	1	21	53	7	27	59	66	14	46	72	20	52
12	90	2,5	7	8	7	1	26	66	8	33	73	81	16	56	89	24	64
12	108	3	9	9	8	1	31	79	10	40	88	98	20	68	107	29	77
12	126	3,5	10	11	10	1	36	92	11	46	102	113	22	78	124	33	89

Примечание y' – шаги обмоток на стороне, противоположной началам фаз, y' – шаги обмоток со стороны начал фаз, $y_{ук}$ – укороченные переходные шаги

Стержни, соединяемые перемычкой, расположены в нижних слоях пазов. Начала и концы перемычек разных фаз обозначены теми же цифрами, что и начала и концы фаз, но римскими: начало и конец перемычки первой фазы – I и IV, второй фазы – II и V, третьей фазы – III и VI.

§ 40. УКЛАДКА СТЕРЖНЕВОЙ ОБМОТКИ РОТОРА В ПАЗЫ

Для укладки обмотки ротор устанавливают выступающими концами вала на подставки, имеющие углубления, таким образом, чтобы к нему можно было свободно подойти с любой стороны и легко повернуть во время работы. Пазы и торцевые части ротора очищают и продувают сжатым воздухом, после чего изолируют обмоткодержатели и в каждый паз устанавливают прокладки на дно и так называемые проходные пазовые короба – дополнительную изоляцию, служащую для защиты пазовой изоляции стержней от повреждений о стенки паза. Пазовые короба для обмотки с изоляцией класса нагревостойкости В делают из электрокартона толщиной 0,15–0,2 мм. Для обмоток с более высоким классом нагревостойкости пазовые короба делают из стеклолакоткани соответствующих марок. Длина пазовых коробов больше длины сердечника ротора на 10–15 мм.

После установки изоляции приступают к разметке пазов. Для этого ротор обертывают полоской электрокартона ближе к стороне контактных колец и закрепляют шнуром, чтобы она не сдвигалась при укладке стержней. Далее определяют первый паз, в который будет уложен начальный стержень первой фазы. В современных асинхронных двигателях контактные кольца располагаются на валу ротора с внешней стороны подшипников (рис. 116). Выводные концы фаз пропускают через внутреннее отверстие вала под подшипниками, которое высверлено в валу со стороны

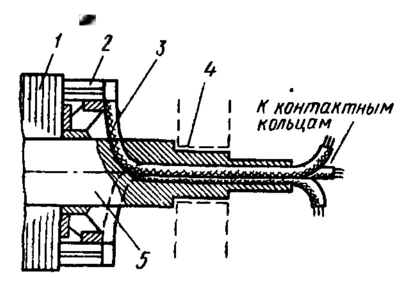


Рис 116. Соединение выводов фаз обмотки с контактными кольцами:

1 – магнитопровод ротора, *2* – стержни обмотки, *3* – выводы к контактным кольцам, *4* – место расположения подшипников, *5* – вал

контактных колец. На уровне торца ротора против расположения концов начальных стержней находятся три радиальных отверстия, в которые должны проходить выводные концы обмотки. Поэтому паз, в котором будет находиться начальный стержень, выбирают, ориентируясь на одно из отверстий на валу для пропуска выводного конца (с учетом сдвига на ширину отгиба лобовой части стержня). На полосе электрокартона, закрепленной на роторе, надписывают номера первого и последующих пазов и по схеме обмотки или таблице расположения стержней на этой же полосе размечают остальные пазы, в которые должны быть помещены начальные и конечные стержни фаз и стержни, соединяемые перемычками.

Стержни поступают на обмоточный участок только с одной изогнутой лобовой частью. В зависимости от своего назначения они имеют различную длину лобовых частей. Чтобы избежать ошибок при установке стержней в пазы, они должны быть заранее рассортированы по размерам.

Укладка начинается со стержней нижнего слоя. Стержни устанавливают с торца ротора со стороны выводов, т. е. со стороны расположения контактных колец. Их вставляют в пазы и продвигают до тех пор, пока расстояние от торца стали ротора до начала изгиба лобовой части стержня не будет соответствовать указанному в чертеже. Стержни должны входить в пазы плотно, но не слишком туго, так, чтобы их можно было продвинуть до требуемого положения в пазу без значительных усилий, могущих привести к изгибу стержня и порче его изоляции.

В нижнем слое обмотки обычно располагают стержни, соединяемые перемычками. Их вставляют в пазы первыми и легкими ударами выколотки через текстолитовую прокладку осаживают на дно паза. При сравнительно небольшом сечении обмотки стержни, соединяемые перемычкой, делают неразрезными, т. е. изгибают сразу два стержня и перемычку между ними в виде искривленной буквы «П». В этих случаях оба стержня с перемычкой укладывают одновременно в предназначенные для них пазы. Следующими устанавливают стержни с укороченными лобовыми частями. Таких стержней надо установить по $(q_2 - 1)$ на каждую фазу. Они располагаются в следующих по ходу отсчета пазах после начала перемычек (см. рис. 110 — стержни в нижнем слое пазов *19, 3, 11*). После этого вкладывают все остальные стержни первого слоя и осаживают их на дно пазов ударами выколотки через текстолитовую пластину.

Удары должны быть не слишком сильные, чтобы не повредить изоляцию лобовых частей. Лобовые части равномерно с одинаковыми промежутками располагают на обмоткодержателе и стягивают временным бандажом из мягкой стальной проволоки в двух местах: по отогнутым концам стержней и в середине лобовых частей.

Изгиб второй лобовой части стержней производят с помощью фасонных ключей, одним из которых удерживают стержень на заданном расстоянии прямолинейного вылета из паза, а другим изгибают лобовую часть, накладывая его сверху на стержень. Чтобы изоляция во время изгибания не повредилась, ключи должны иметь закругленные кромки, а усилие не должно быть резким. Сразу изогнуть лобовую часть стержня на требуемый угол невозможно, так как рядом находятся еще не изогнутые лобовые части других стержней. Поэтому стержни изгибают постепенно, за несколько обходов, постоянно увеличивая угол отгиба до требуемого. Изогнутые лобовые части осаживают ударами деревянного молотка на обмоткодержатели и стягивают временными бандажами из мягкой стальной проволоки. После этого таким же образом отгибают концы стержней. Временные бандажи снимают и поверх лобовых частей нижнего слоя устанавливают межслойную изоляцию. Число слоев, марка изоляционных материалов и общая толщина межслойной изоляции указываются в технической документации. После этого в пазы на нижние стержни устанавливают прокладки из полосок механически твердового изоляционного материала. Толщина изоляционного материала, из которого нарезают прокладки, обычно 0,5 мм. Чтобы создать достаточное расстояние, между верхними и нижними стержнями устанавливают по три прокладки общей толщиной 1,5 мм. Стержни верхнего слоя вставляют в пазы со стороны, противоположной контактным кольцам. Первыми в отмеченные пазы вставляют начальные и конечные стержни фаз, потом остальные стержни верхнего слоя. Затем изгибают их лобовые части так же, как и нижних стержней, рихтуют и осаживают, прижимая пазовые и лобовые части к межслойной изоляции. Одновременно с помощью деревянного молотка и стальной лопатки выравнивают лобовые части.

После этого заклинивают пазы, предварительно установив прокладки под клин. Для прокладок используют те же материалы, что и в прокладках между слоями. Их располагают поверх пазовых коробов.

Далее приступают к соединению стержней друг с другом. Со стороны, противоположной контактным кольцам, стержни соединяют с одинаковым шагом: верхний стержень одного паза с нижним, лежащим в пазу на расстоянии шага обмотки от первого. Со стороны контактных колец начала и концы фаз и стержни, соединенные перемычками, не соединяются с другими стержнями. Кроме того, рядом с началами перемычек расположены стержни, имеющие укороченные шаги. Чтобы не ошибиться, обмотчик отмечает начальные и конечные стержни каждой фазы и в первую очередь соединяет лобовые части стержней с укороченными шагами (q_2 – 1 соединений на фазу) Вся остальная обмотка имеет нормальные шаги.

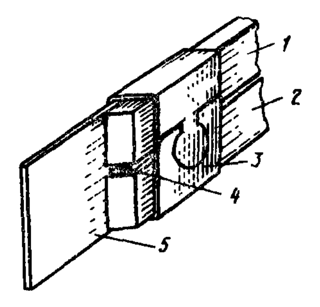


Рис 117 Хомутики для соединения стержней

Стержни соединяют между собой с помощью медных хомутиков *3* (рис. 117), которые надеваются на концы двух стержней *1* и *2*. Хомутики могут быть различной конструкции, однако в любом случае у них должен быть «замок», препятствующий разгибанию согнутого хомутика, и прорезь для лучшего заполнения места спайки припоем. В часть хомутиков вставляют вентиляционные флажки *5*. Число флажков и расстояние между ними указываются в чертеже. Установив хомутик, между стержнями забивают медный клин *4*, чтобы концы стержней были прочно закреплены в хомутике Если стержни, которые должны быть соединены перемычками, выполнены раздельными, то их концы также с помощью хомутиков соединяют с изолиро-

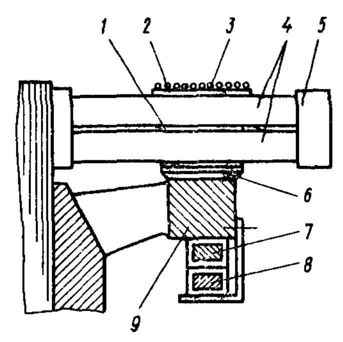


Рис 118. Расположение перемычек на роторе:

1 – прокладка между слоями в лобовых частях, *2* – подбандажная изоляция, *3* – бандаж, *4* – стержни обмотки, *5* – соединительный хомутик, *6* – изоляция обмоткодержателя, *7* – соединительная нулевая шина, *8* – перемычка, *9* – обмоткодержатель

ванной перемычкой. Перемычки крепятся под обмоткодержателем, как показано на рис. 118. Большей частью обмотки ротора соединяют в звезду. В этом случае конечные стержни фаз соединяют с нулевой шиной – с медным изолированным кольцом, имеющим три отвода к каждому из концов фаз. При соединении схемы в треугольник или в две параллельные ветви все соединения выполняют перемычками, которые соединяют с концами стержней с помощью хомутиков.

После того как схема соединена, на лобовые части обмотки накладывают подбандажную изоляцию, закрепляют ее лентой и наматывают временные бандажи. Перед тем как запаять или сварить все соединения, необходимо испытать изоляцию ротора высоким напряжением. Для этого концы стержней обертывают мягкой неизолированной проволокой, один электрод испытательной установки соединяют с корпусом ротора, а второй – с любым из стержней или с этой проволокой и проводят испытания. После испытания производят пайку или сварку всех соединений и наматывают постоянный бандаж. Запаянные хомутики тщательно изолируют ленточным изоляционным материалом, например микалентой или стекломикалентой, поверх которого для защиты от выветривания при работе машины накладывают слой стеклянной или лавсановой ленты.

Места соединений начальных стержней фаз с контактными кольцами изолируют в зависимости от напряжения на кольцах двумя – четырьмя слоями вполнахлеста стеклолакотканью ССЭ (класс изоляции А) или АСП (классы изоляции В и F) или стекломикаленты (классы изоляции F или H). Поверх основной изоляции накладывают защитный слой вполнахлеста из стеклоленты. Выводы фаз поочередно протягивают в отверстие вала с помощью шнура, соединяют с начальными стержнями фаз, а вторые концы – с контактными кольцами.

§ 41. КОРОТКОЗАМКНУТЫЕ РОТОРЫ

Короткозамкнутые роторы выпускают двух типов: с обмоткой из вставных стержней или с литой обмоткой. В пазы ротора с обмоткой из вставных стержней (рис. 119) устанавливают неизолированные стержни *2*, замкнутые на торцах ротора замыкающими кольцами *1* накоротко. Концы стержней впаивают или вваривают в прорези замыкающих колец.

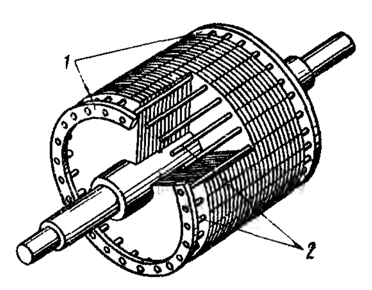


Рис 119. Короткозамкнутый ротор с обмоткой из вставных стержней

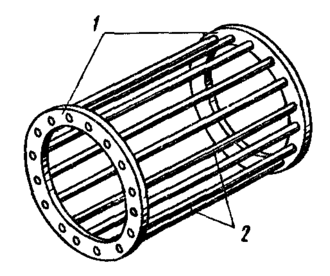


Рис. 120. Короткозамкнутая обмотка ротора:

1 – замыкающие кольца, *2* – стержни

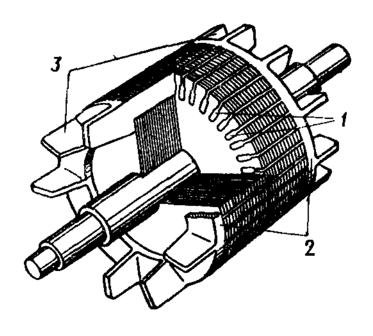


Рис. 121. Ротор с литой обмоткой:

1 – стержни, *2* – замыкающие кольца, *3* – вентиляционные лопатки

В машинах общего назначения вставные стержни и кольца делают из медных шин нужного профиля: стержни из прямоугольного или круглого, замыкающие кольца – из прямоугольного (рис. 120). В новых сериях крупных асинхронных двигателей мощностью в тысячу и более кВт (серия АН-2) замкнутую обмотку выполняют из алюминиевых прямоугольных шин.

Еще более упрощается технология изготовления короткозамкнутых роторов, если их обмотку делать не из вставных стержней, а заливкой расплавленного проводникового материала в пазы сердечника ротора (рис. 121). Для заливки применяют сплавы алюминия, имеющие сравнительно небольшое удельное сопротивление (в 1,7 раза больше, чем медь) и низкую температуру плавления (660 °С).

Работы по заливке короткозамкнутых роторов, установке и пайке или сварке обмоток со вставными стержнями выполняют электрослесари, но обмотчики должны знать особенности конструкции и методы изготовления короткозамкнутых роторов асинхронных машин.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в фазных роторах применяют волновые стержневые обмотки?
2. Какие шаги обмотки фазного ротора укорачивают или удлиняют?
3. Как располагают начала фаз обмотки ротора?
4. Можно ли на роторе выполнить обмотку с дробным числом пазов на полюс и фазу?
5. Используя табл. 7, определить, в каких пазах располагаются выводные концы фаз и перемычек стержневой волновой обмотки с $Z = 72$, $2p = 6$. Можно ли эту обмотку соединить в две параллельные ветви?
6. В какой последовательности устанавливают стержни в пазы ротора?
7. Как изгибают лобовые части стержней после их установки в пазы?
8. Зачем нужны хомутики при соединении стержней?
9. Каким металлом заливают пазы короткозамкнутых роторов?

ГЛАВА XI
ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 42. СХЕМЫ ОБМОТОК

Схемы обмоток якорей машин постоянного тока изображаются на чертежах так же, как и схемы машин переменного тока, т. е. в виде торцевых (вид со стороны коллектора) или развернутых схем. Наибольшее распространение получили развернутые схемы. Их изображение по сравнению со схемами обмоток статоров машин переменного тока имеет ряд особенностей.

Каждая катушка обмотки якорей машин постоянного тока состоит из нескольких секций и имеет столько пар выводных концов, сколько секций в ней содержится. Выводные концы секций соединены с разными пластинами коллектора. Поэтому на схеме обмотки якоря нужно либо каждую секцию изображать отдельным многоугольником, либо показывать пазовые части катушки одной линией, а лобовые части каждой секции изображать отдельными линиями. Последний способ более употребителен. На рис 122 дана развернутая схема простой петлевой обмотки, каждая катушка которой содержит три секции. Пазовые части катушек изображены одной сплошной или пунктирной в зависимости от положения в пазу линией, а в лобовых

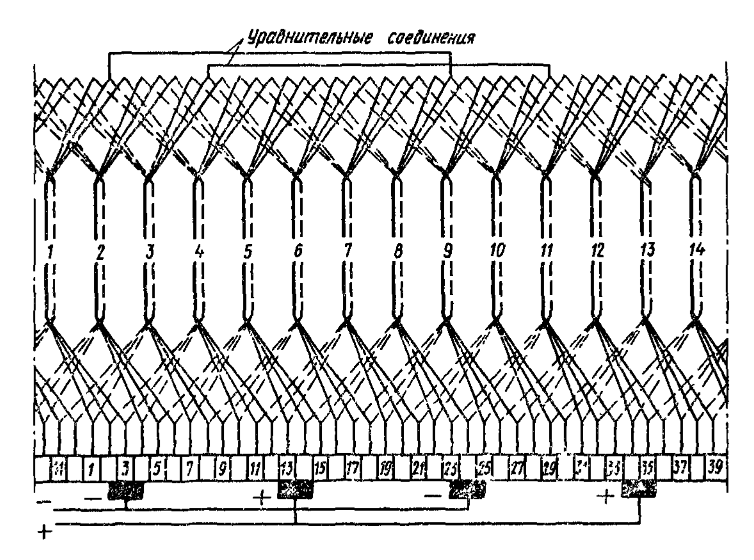


Рис 122 Схема простой петлевой обмотки якоря с $Z=14$, $2p=4$. $K=42$

частях эти линии разветвляются: от каждой линии паза отходит три линии, обозначающие лобовые части секций, входящих в катушку. Начало и конец каждой секции соединяются с коллекторными пластинами. Пазы и коллекторные пластины обязательно нумеруются, и на коллекторных пластинах показывают места расположения щеток.

Схемы симметричных обмоток якоря состоят из ряда повторяющихся элементов, поэтому для укладки обмотки используют более простые так называемые практические схемы (рис. 123). В них отдельно вычерчивают секции только одной катушки: их расположение в пазах якоря и соединение с пластинами коллектора. На рис. 123 приведена практическая схема той же обмотки (см. рис. 122).

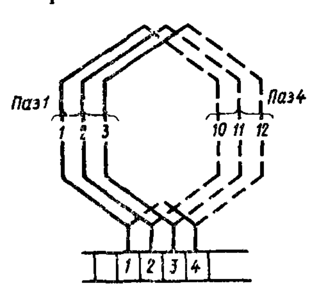


Рис 123 Практическая схема простой петлевой обмотки с $u_п = 3$, $y_1 = 9$

Три стороны секций, расположенные в верхнем слое 1-го паза, обозначены сплошными линиями, и три, лежащие в нижнем слое 4-го паза, — пунктирными. Остальные секции располагаются в пазах якоря и соединяются с коллектором точно так же, как показанные на схеме.

Для изучения схем обмоток якорей значительно удобнее представлять их в условном виде, считая, что в каждом пазу располагается только по две стороны секций: одна в верхнем, другая в нижнем слое. Такие пазы называют элементарными; их число обозначают $Z_э$. Число сторон секций в одном слое реального паза обозначают буквой $u_п$, а число пластин коллектора — буквой K. Число элементарных пазов всегда равно числу реальных пазов якоря, умноженных на $u_п$, и числу пластин коллектора $Z_э = Zu_п = K$.

Так, например, на схеме (см. рис. 122) изображена обмотка с $Z = 14$ и $u_п = 3$, следовательно, число пластин коллектора и число элементарных пазов и число секций в обмотке будет равно $Z_э = K = Zu_п = 14 \cdot 3 = 42$.

По направлению отгиба лобовых частей секций обмотки якорей разделяются на петлевые и волновые. Петлевые обмотки называют часто параллельными, а волновые — последовательными. Обмотки могут быть также простыми и сложными. Рассмотрим вначале схемы петлевых обмоток

§ 43. ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В отличие от катушек обмотки машин переменного тока, имеющих только один определенный шаг, в секциях обмотки якоря различают три различных шага, которые выражают в элементарных пазах (рис. 124): y_1 — первый частичный шаг — это расстояние между сторонами одной секции, т. е. ширина секции, выраженная в элементарных пазах, второй частичный шаг y_2 — расстояние между левой стороной одной секции и правой стороной последовательно соединенной с ней следующей секции; результирующий шаг y — расстояние между одноименными сторонами (левыми или правыми) двух соседних последовательно соединенных в схеме секций; он показывает их сдвиг по элементарным пазам: $y = y_1 - y_2$. Шаг y может быть положительным или отрицательным в зависимости от последовательности соединения секций в схеме. На рис. 124, *а* показана прямая последовательность соединения, на рис. 124, *б* — обратная. Как видно, при обратной последовательности выводные концы каждой секции перекрещиваются в лобовых частях, поэтому такое соеди-

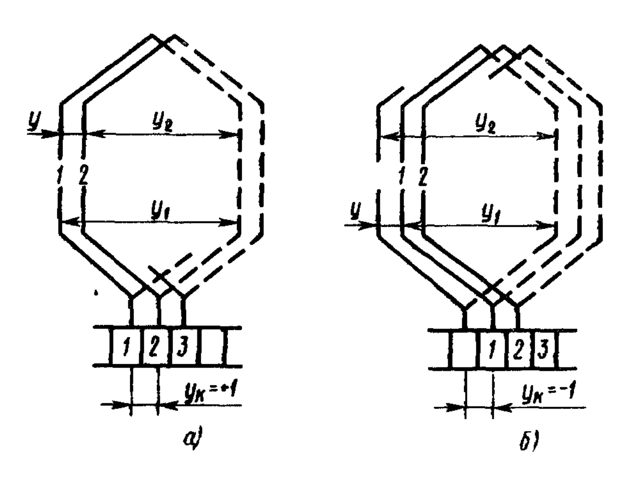


Рис. 124. Обозначения шагов в петлевых обмотках:
а – при $y_к = +1$, *б* – при $y_к = -1$

нение применяют редко, только в специальных случаях. Кроме шагов в элементарных пазах в схемах различают шаг по коллектору $y_к$, т. е. число коллекторных пластин между началами следующих по схеме одна за другой секций. Так как число пластин коллектора равно числу элементарных пазов, то числа, определяющие результирующий шаг y и шаг по коллектору $y_к$, совпадают: $y = y_к$. В простой петлевой обмотке результирующий шаг всегда равен единице, т. е. $y_к = y = y_1 - y_2 = \pm 1$.

Ширина секции в петлевых обмотках выбирается равной или близкой полюсному делению, т. е. $y_1 \approx Z_э/2p$. Все $u_п$ секций могут быть объединены в одну катушку в том случае, если стороны этих секций будут располагаться в одних пазах якоря. Поэтому y_1 выбирают таким, чтобы $y_1/y_п$ было бы равно целому числу, которое определит шаг катушки по реальным пазам якоря $y_z = \dfrac{y_1}{u_п}$. Обмотки, в которых это условие не соблюдено, не могут быть выполнены из целых катушек; они называются ступенчатыми.

Рассчитаем шаги простой петлевой обмотки якоря со следующими данными: $Z = 37$; $2p = 4$; $u_п = 3$. Число элементарных пазов, равное числу коллекторных пластин: $Z_э = K = Zu_п = 37 \cdot 3 = 111$. Полюсное деление якоря

$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{37}{4} = 9^1/_4$ выражается дробным числом пазовых

делений. Шаг обмотки по пазам выбираем равным ближайшему к значению τ целому числу: $y_z = 9$, или (1 – 10). Шаг по коллектору простой петлевой обмотки $y_к = 1$. Шаги обмотки по элементарным пазам: $y_1 = y_z u_п = 9 \cdot 3 = 27$, или (1 – 28); $y = y_к = 1$, или (1 – 2); $y_2 = y_1 - y = 27 - 1 = 26$, или (1 – 27).

На практической схеме этой обмотки (рис. 125) видно, что стороны первых трех секций обмотки лежат верхними сторонами в 1, 2 и 3-м элементарных пазах, а нижними сторонами – в 28, 29 и 30-м пазах. Эти три секции образуют одну катушку обмотки, верхняя сторона которой располагается в 1-м реальном пазу якоря, а нижняя – в 10-м. Начало первой секции соединено с первой пластиной коллектора; конец первой и начало второй секций – со второй пластиной; конец второй и начало третьей – с третьей пластиной и т. д. С каждой пластиной соединяются выводы секций, находящиеся один в верхнем слое обмотки и один в нижнем слое на расстоянии шага $y_2 = 26$ элементарных пазов друг от друга.

Обмотку для того же якоря ($Z = 37$, $2p = 4$, $u_п = 3$) можно выполнить и с другим шагом y_1, например, равным $y_1 = 28$. Тогда при $y = y_к = 1$ второй частичный шаг $y_2 = y_1 - 1 = 28 - 1 = 27$. В такой обмотке шаг секций по пазам якоря не будет выражаться целым числом пазовых

делений $y_z = \frac{y_1}{u_п} = \frac{28}{3} = 9^1/_3$, поэтому секции будут иметь

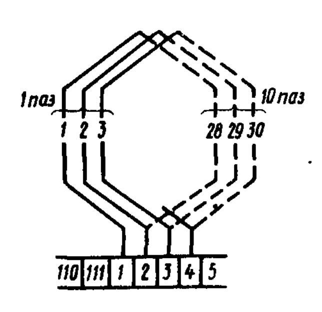


Рис. 125. Практическая схема обмотки якоря с $Z=37$, $2p=4$, $y_1=27$

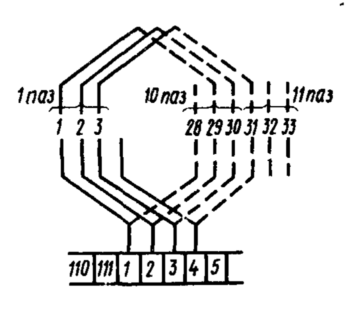


Рис 126 Практическая схема обмотки якоря с $Z = 37$, $2p = 4$, $y_2 = 28$

различные шаги по пазам якоря. Обмотка получается ступенчатой. Эти секции нельзя объединять в одну катушку, поэтому такие схемы применяют только в стержневых обмотках, когда обмотка изготовляется из стержней, а соединения в лобовых частях производят после укладки обмотки в пазы якоря. Практически схема ступенчатой обмотки с рассчитанными шагами показана на рис. 126. 1-я и 2-я секции 1-го паза этой обмотки имеют шаг, равный девяти пазовым делениям. Их нижние стороны расположены в 10-м пазу. Шаг 3-й секции равен десяти пазовым делениям и ее нижняя сторона помещена в 11-м пазу.

В стержневой обмотке с такой схемой стороны 1, 2 и 3-й секций объединяются в один стержень, имеют общую корпусную изоляцию и укладываются в 1-й паз. Так же объединяются по три и нижние стороны секций, размещающиеся в 10-м и 11-м пазах якоря. Лобовые части стержней соединяют после укладки, как указано на схеме, чтобы они образовали секции с шагом по элементарным пазам $y_1 = 28$.

Простая петлевая обмотка представляет собой как бы ряд последовательно соединенных друг с другом секций (петель), расположенных вдоль всей окружности якоря. Начала и концы секций соединяются с пластинами коллектора, к поверхности которого прижаты щетки. Места расположения щеток на коллекторе и их число зависят от числа полюсов машины. В двухполюсных машинах щетки располагаются друг против друга по диаметру коллектора. В четырехполюсной машине щетки располагаются через каждую четверть окружности коллектора, в шестиполюсной – через 1/6 часть окружности, в машинах с $2p$ полюсами – через $1/2p$ часть окруж-

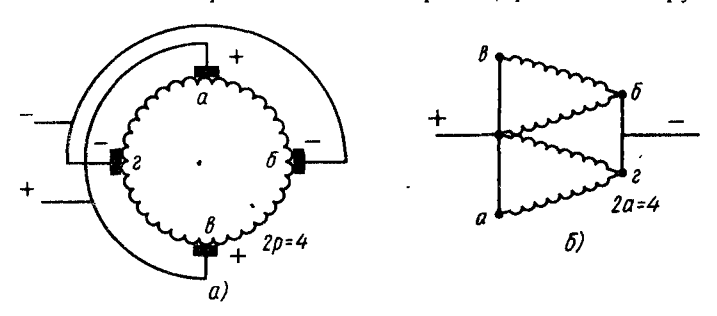


Рис. 127. Параллельные ветви в петлевой обмотке с $2p = 4$: а – положение щеток на коллекторе, б – подразделение обмотки на параллельные ветви

ности. Щетки имеют разную полярность «+» и «–». Все щетки одинаковой полярности соединяются друг с другом. При этом отдельные пластины коллектора оказываются соединенными между собой накоротко, а секции обмотки образуют несколько параллельных ветвей (рис. 127). Число параллельных ветвей простой петлевой обмотки всегда равно числу полюсов машины: в двухполюсной машине будет две параллельные ветви, в обмотке четырехполюсной машины – 4, в шестиполюсной – 6 и т. д. Число параллельных ветвей в обмотках машин постоянного тока обозначается $2a$. В простой петлевой обмотке всегда $2a = 2p$.

§ 44. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПЕРВОГО РОДА

Распределение тока между параллельными ветвями любой электрической цепи зависит от их сопротивлений и эдс этих ветвей.

Параллельные ветви петлевой обмотки образуются из нескольких последовательно соединенных секций, в каждой из них при работе машины наводятся эдс. Если эдс во всех параллельных ветвях будут абсолютно одинаковы, а сопротивления ветвей равны между собой, то токи в них также будут одинаковые. В реальной машине из-за допусков при штамповке и шихтовке сердечников, при сборке машины, неравномерности воздушного зазора под разными полюсами и из-за ряда других причин технологического характера всегда существует некоторая асимметрия магнитной цепи. Поэтому эдс, наводимые в секциях в разных параллельных ветвях, немного отличаются друг от друга. Сопротивления параллельных ветвей также несколько различаются между собой из-за различного качества паек мест соединений секций и коллектора. По этим причинам токи в параллельных ветвях петлевой обмотки якоря никогда не бывают абсолютно одинаковые, и между ветвями циркулируют уравнительные токи. Они замыкаются через скользящие контакты между щетками и поверхностью коллектора и перегружают их. При этом коммутация машины ухудшается, появляется искрение под щетками, пластины подгорают и коллектор быстро выходит из строя.

Чтобы разгрузить щеточные контакты от уравнительных токов, в якорях с петлевой обмоткой устанавливают уравнительные соединения первого рода. Уравнительные соеди-

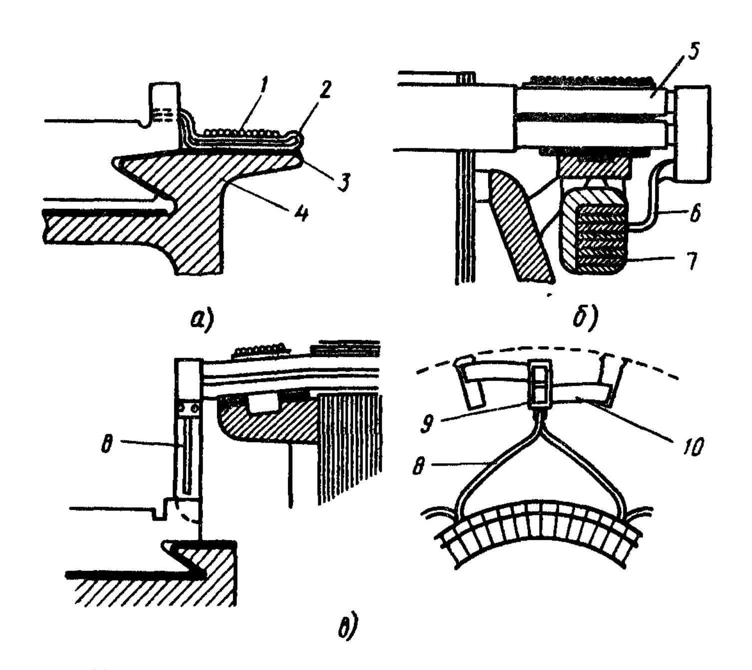


Рис. 128. Конструкция уравнительных соединений первого рода: *а* – вилочные, *б* – кольцевые, *в* – эвольвентные, *1* – бандаж уравнительных соединений, *2* – вилочные уравнительные соединения, *3* – миканитовая изоляция нажимного конуса, *4* – нажимной конус, *5* – лобовые части обмотки якоря, *6* – отпайки кольцевых уравнительных соединений, *7* – кольцевые уравнительные соединения, *8* – эвольвентные уравнительные соединения, *9* – соединение эвольвентных уравнителей с обмоткой, *10* – лобовые части секций якоря

нения – это изолированные проводники, которые соединяют точки обмотки, имеющие одинаковые потенциалы. Уравнительные соединения не уменьшают асимметрию обмотки и не способствуют уменьшению уравнительных токов, а лишь направляют их по безвредному для работы машины пути, обеспечивая нормальную работу щеточного контакта без перегрузки, создаваемой уравнительными токами.

В простой петлевой обмотке одинаковые потенциалы будут у всех секций, расположенных на расстоянии двойного полюсного деления друг от друга. Поэтому шаг уравнительных соединений равен $y_{ур} = K/p$. Наиболее удобные места для подсоединения уравнителей к секциям – это коллекторные пластины или головки лобовых частей секций со стороны, противоположной коллектору.

В машинах общего применения чаще всего устанавливают по два-три уравнительных соединения на каждую пару параллельных ветвей или по одному уравнительному соединению на паз якоря, т. е. в 3—4 раза меньше, чем секций в обмотке.

На рис. 128 показаны различные конструкции и способы установки уравнительных соединений. Вилочные уравнительные соединения (рис. 128, *а*) впаиваются в торцы пластин коллектора со стороны якоря ниже места подсоединения выводных концов секций. Они похожи на как бы отрезанные лобовые части катушек двухслойной обмотки с шагом $y_{ур} = K/2p$. Уравнительные соединения такой конструкции устанавливают до начала укладки обмотки и надежно изолируют, так как после укладки обмотки доступ к ним невозможен.

На некоторых машинах устанавливают уравнительные соединения кольцевого типа (рис. 128, *б*). Они представляют собой кольца, расположенные под лобовыми частями якоря со стороны, противоположной коллектору. От каждого кольца отходят отпайки для соединения с лобовыми частями секций. Число отпаек на каждом кольце равно числу пар полюсов в машине, а число колец — числу секций в каждой параллельной ветви, соединенных уравнителями.

В крупных машинах постоянного тока, у которых диаметр якоря много больше диаметра коллектора, уравнительные соединения используют одновременно для соединения обмотки якоря с коллектором (рис. 128, *в*).

§ 45. СЛОЖНЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

Число параллельных ветвей в простой петлевой обмотке всегда равно числу полюсов машины. В мощных машинах, ток которых превышает несколько тысяч ампер, на якоре устанавливают сложную петлевую обмотку, число параллельных ветвей в которой больше, чем в простой. Рассмотрим схему построения одной из сложных петлевых обмоток — двухходовую, двукратнозамкнутую петлевую. Представим себе, что секции простой петлевой обмотки расположены не во всех элементарных пазах, а через один, и их выводные концы соединены с коллекторными пластинами также через одну. Результирующий шаг такой обмотки и шаг по коллектору $y = y_к = y_1 - y_2 = 2$, а не единице, как в простой

обмотке. Если таким образом уложить и соединить все секции, то окажется, что в половине элементарных пазов секций не будет, и половина пластин коллектора останется не соединенной с обмоткой (рис. 129). Так, если начать укладку с первого паза, то будут заполнены все нечетные пазы, а секции в них будут соединены только с нечетными коллекторными пластинами. В оставшиеся свободными пазы можно уложить вторую точно такую же обмотку и соединить выводные концы ее секций с четными пластинами коллектора (рис 130). Таким образом, на якоре будут расположены как бы две простые петлевые обмотки, в каждой из которых по $2a = 2p$ параллельных ветвей. Общее число параллельных ветвей обмотки удвоится. Если первую простую обмотку укладывать, оставляя свободными два, три или большее число пазов, и потом заполнить эти пазы секциями других простых обмоток, то результирующий шаг обмотки также будет равен двум, трем

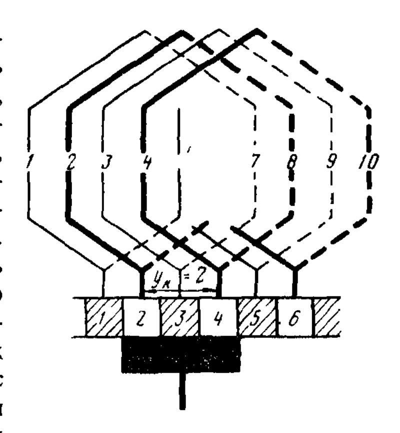


Рис 129 Элемент схемы сложной двухходовой петлевой обмотки

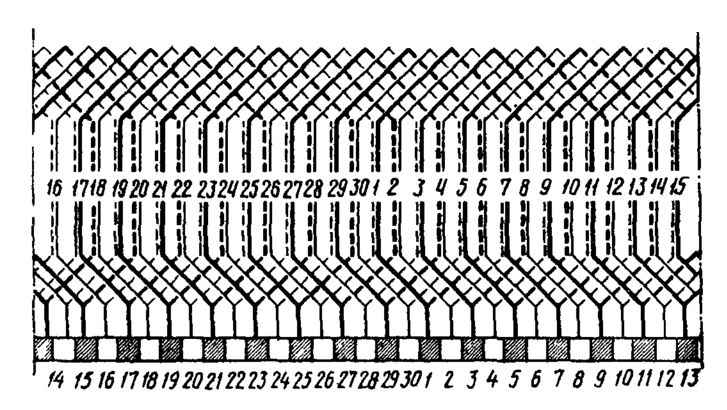


Рис 130 Схема двукратнозамкнутой сложной петлевой обмотки с $Z = 30$, $2p = 4$, $K = 30$

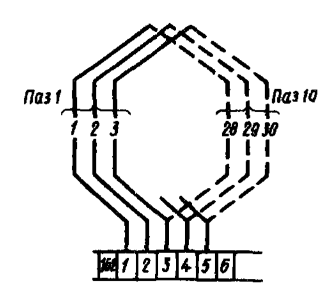


Рис. 131 Практическая схема сложной двухходовой петлевой обмотки с $Z = 54$, $2p = 6$, $u_п = 3$

или большему числу. Во столько же раз возрастает и общее число параллельных ветвей. Такие обмотки часто называют множественными петлевыми. Число простых обмоток, из которых образована множественная обмотка, равно результирующему шагу по коллектору, его обозначают буквой m, а обмотку называют m-ходовой.

Следовательно, в сложных петлевых обмотках $y = y_1 - y_2 = m$, а число параллельных ветвей $2a = 2pm$. Чтобы все секции обмоток якоря работали одинаково, щетки на коллекторе должны одновременно замыкать пластины, соединенные с секциями всех обмоток, поэтому щетки делают более широкими, чем при простой петлевой обмотке.

Рассмотрим, как составить практическую схему двухходовой сложной петлевой обмотки ($m = 2$) для якоря машины с $2p = 6$, в котором $Z = 54$, $u_п = 3$ (рис. 131).

Расчет шагов проводится по тем же формулам, что и для простых петлевых обмоток (см. § 43), с учетом того, что $y = y_к = m = 2$; $K = 54 \cdot 3 = 162$; $y_z = \frac{Z}{2p} = \frac{54}{6} =$ $= 9$; $y = y_к = m = 2$; $y_1 = y_z u_п = 9 \cdot 3 = 27$; $y_2 = y_1 - y = 27 -$ $- 2 = 25$; $2a = 2pm = 6 \cdot 2 = 12$.

Мы рассмотрели обмотку с $m = 2$ при четном числе пластин коллектора ($K = 162$). Если на коллекторе такой машины приподнять все щетки, то обмотка якоря разделяется на две замкнутые обмотки, электрически не соединенные друг с другом. Одна из них соединяется с четными, а другая – с нечетными пластинами коллектора. Такая сложная обмотка называется двукратнозамкнутой. Если же число пластин коллектора и элементарных пазов якоря будет нечетное, то положение изменится. Начав укладывать секции так же, как и раньше, через один элементарный паз, и соединять их выводы через одну коллекторную пластину,

мы, обойдя окружность якоря один раз, т. е. сделав один ход, не замкнем обмотку, а перейдем к оставшимся свободным пазам и коллекторным пластинам. Все пазы якоря будут заполнены после второго обхода. Так же произойдет и в обмотках с $y_к = m$, если число пластин коллектора не будет кратно m. В этом случае все пазы якоря будут заполнены после m обходов и все секции обмотки окажутся соединенными между собой электрически независимо от наличия щеток на коллекторе. Обмотка будет однократнозамкнутой, но щетки, замыкая сразу несколько пластин коллектора, разделяют ее также на число параллельных ветвей, равное $2a = 2pm$, как и в предыдущей обмотке.

§ 46. ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

Ширина секции волновой обмотки примерно равна полюсному делению, так же как и в петлевых обмотках, но их лобовые части соединяются не с соседними пластинами коллектора, а с пластинами, расположенными друг от друга

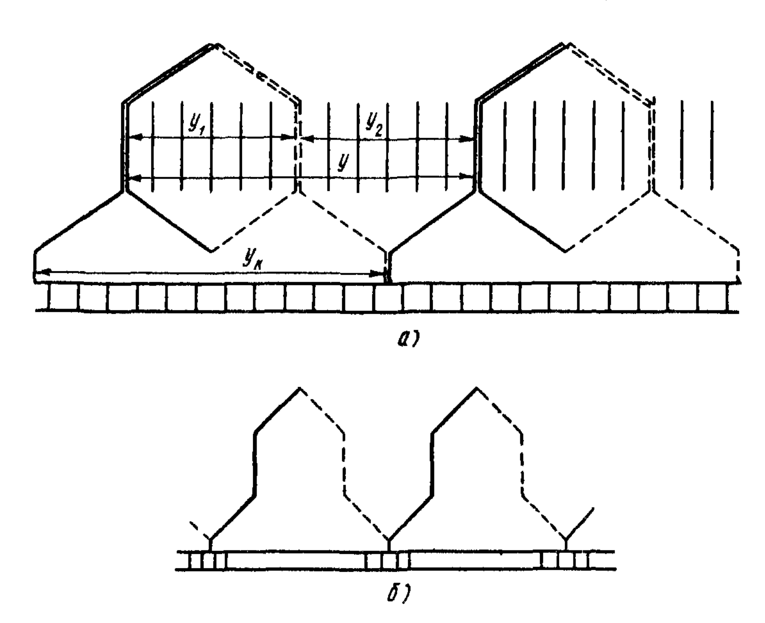


Рис 132 Элементы схемы и обозначение шагов волновой обмотки якоря:

а двухвитковые секции обмотки, *б* — часть схемы

на расстоянии, близком к двойному полюсному делению. Поэтому лобовые части секции волновой обмотки отогнуты в разные стороны от оси секции (рис. 132). Результирующий шаг обмотки по элементарным пазам равен шагу по коллектору $y = y_к$, т. е. тоже близок к двойному полюсному делению. Напомним, что двойное полюсное деление, выраженное в коллекторных делениях, равно $\tau_к = K/p$. Но в простой волновой обмотке шаг $y_к$ не может быть равен $\tau_к$, он должен быть или немного больше, или немного меньше, чем полюсное деление.

Если принять $y_к = \tau_к$, то при построении обмотки, сделав p шагов, т. е. столько шагов, сколько пар полюсов в машине, мы завершим полный обход по окружности якоря и коллектора, и конец последней секции попадет опять на ту же пластину коллектора, с которой соединено начало первой секции, так как $\tau_к p = K$ и уложенные секции будут замкнуты сами на себя. Чтобы уложить все секции в пазы, их шаг по коллектору уменьшают или увеличивают так, чтобы после одного обхода (после p шагов) конец секции соединялся с пластиной коллектора, находящейся рядом с первоначальной, т. е. $y_к p = K \mp 1$. Из этого условия шаг простой волновой обмотки

по коллектору должен быть $y_к = \dfrac{K \mp 1}{p}$.

При знаке плюс после каждого полного обхода по окружности якоря (после каждых p шагов) концы секций соединятся с пластинами коллектора, следующими за первоначальными, так как $py_к = K + 1$. Лобовые части секций перекрестятся между собой (рис. 133, *а*) и обмотка получится перекрещивающейся, так же как и петлевая обмотка с шагом по коллектору, равным $y_к = -1$.

При знаке минус – конец последней в обходе секции соединяется с пластиной коллектора, предшествующей первоначальной, и лобовые части секций располагаются без перекрещиваний (рис. 133, *б*). Такая обмотка более удобна в технологическом отношении и более распространена в практике электромашиностроения. Поэтому знак минус в этой формуле ставится как основной.

В простой волновой обмотке число параллельных ветвей всегда равно двум независимо от числа полюсов в машине ($2a = 2$).

На рис. 134 изображена схема простой волновой обмотки, в которой для большей наглядности принято малое число

пазов и коллекторных пластин $Z = K = 19$; $u_п = 1$; $2p = 4$. Жирными линиями выделена секция обмотки, соединенная в определенный момент со щетками на коллекторе. Расстояние между одноименными щетками по поверхности коллектора такое же, как между началом и концом секции, поэтому при установке щеток обмотка соединяется в две параллельные ветви. На рис. 135, *а* показано, как образуются параллельные ветви простой волновой обмотки машины

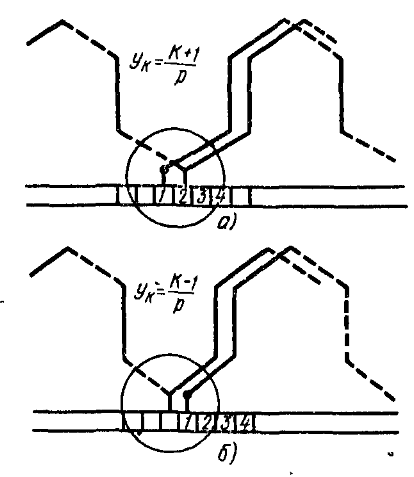
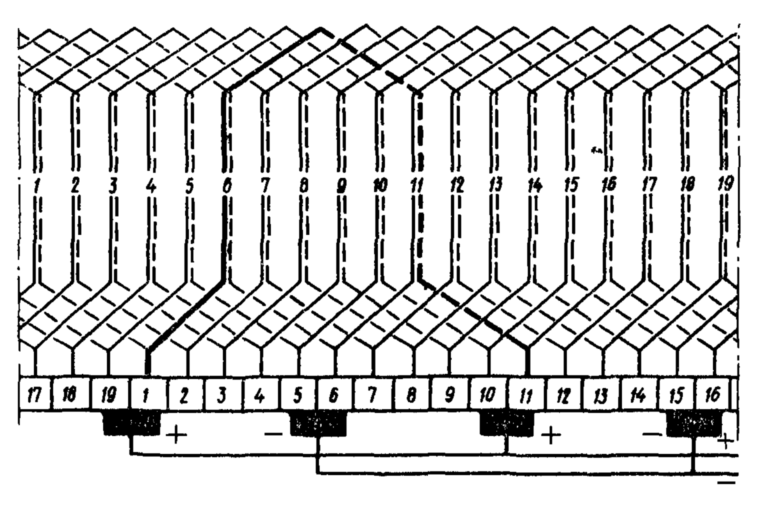


Рис 133 Волновая обмотка. *а* – перекрещивающаяся, *б* – неперекрещивающаяся

Рис 134 Схема простой волновой обмотки с $Z = K = 19$



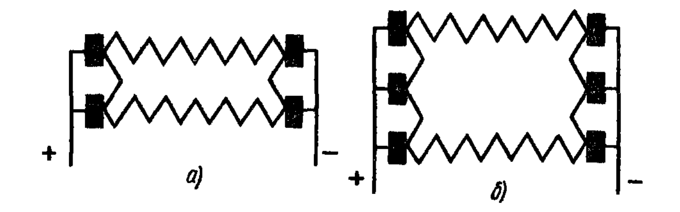


Рис 135 Параллельные ветви в волновой обмотке
а – при $2p = 4$, *б* – при $2p = 6$

с $2p = 4$, а на рис. 135,*б* – с $2p = 6$. И в том и другом случае число параллельных ветвей в обмотке не меняется. Оно останется также равным двум и при других числах полюсов. Это является одной из основных особенностей простой волновой обмотки. В обмотке с $2a = 2$ нет точек с постоянными одинаковыми потенциалами, уравнительные токи не возникают и не требуется установки уравнительных соединений. Поэтому простая волновая обмотка в технологическом отношении проще, чем петлевая, и ее применяют почти во всех машинах малой и средней мощности, в которых ток не превышает 500–600 А, т. е. в каждой параллельной ветви остается меньше, чем 250–300 А.

Машина с волновой обмоткой якоря в отличие от машин с петлевой обмоткой может работать с неполным числом щеточных болтов. Если на схеме (см. рис. 135) удалить по одной из щеток разной полярности, то направление токов в каждой ветви не изменится, добавится только по одной секции в каждую ветвь Это свойство волновых обмоток используют на практике в тех случаях, когда габариты машины не позволяют расположить на коллекторе полное число щеточных болтов, например, в ряде конструкций тяговых двигателей.

Волновые обмотки, так же как и петлевые, могут быть сложными. В сложных волновых обмотках шаг по коллектору изменяют с таким расчетом, чтобы после первого обхода по окружности (после первых p шагов обмотки) конец последней секции попал на коллекторную пластину, отстоящую от первой не на одно, а на несколько коллекторных делений: 2 – при двухходовой обмотке, 3 – при трехходовой и в общем случае на m коллекторных делений при m-ходовой обмотке. Шаг по коллектору сложной волновой

обмотки $y_к = \frac{K \mp m}{p}$. Число параллельных ветвей в ней, так же как и в сложной петлевой обмотке, увеличивается в m раз, т. е. $2a = 2m$.

§ 47. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ВТОРОГО РОДА

Для нормальной работы машины постоянного тока напряжение между соседними коллекторными пластинами должно быть одинаковым на всем коллекторе. Это условие в якорях с простой петлевой или волновой обмоткой зависит в основном от качества пайки выводных концов к коллекторным пластинам, и при хорошем выполнении обмоточных работ практически всегда удовлетворяется. В якорях со сложными обмотками напряжение между соседними коллекторными пластинами может оказаться различным даже при хорошем выполнении пайки обмотки к коллектору из-за асимметрии магнитной цепи машины.

Рассмотрим, например, сложную петлевую обмотку с $m = 2$ (рис. 136). Секции, входящие в один ход обмотки, соединены с пластинами *1*, *3*, *5* и т. д. Напряжение между этими пластинами в нормально выполненной обмотке будет одинаково: $U_{к13} = U_{к35} = \ldots$. Секции второго хода обмотки соединены с четными пластинами коллектора: *2*, *4*, *6* и т. д. Напряжение между ними также будет одинаково $U_{к24} = U_{к46} = \ldots$. Но напряжения между первой и второй пластиной $U_{к12}$, между второй и третьей пластиной $U_{к23}$ и т. д. могут оказаться неодинаковыми из-за различных причин, связанных с выполнением штамповочных и сборочных работ. При этом через щетку, замыкающую, например, 1-ую и 2-ую пластины, потечет уравнительный ток, что приведет к перегрузке щеточного контакта. Кроме того, уменьшение одного из напряжений, например, между первой и второй пластиной ($U_{к12}$) приведет к увеличению напряжения $U_{к23}$, так как напряжение $U_{к13}$ не меняется. Это вызовет усиленное искрение под щетками и неблагоприятно отразится на работе коллектора. Чтобы этого не произошло, напряжения между соседними коллекторными пластинами искусственно выравнивают, добиваясь, чтобы $U_{к12} = U_{к23} = U_{к34} = \ldots$ и т. д. Для этого каждую пластину коллектора соединяют со средней точкой секции, концы которой соединены с соседними с ней пластинами. На рис. 136 показано такое соединение: пластина *3* соединена с серединой лобовой

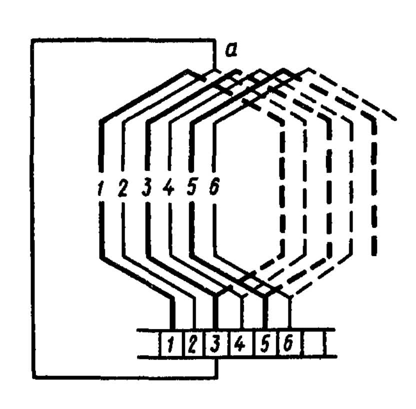


Рис. 136. Уравнительные соединения второго рода в двухходовых петлевых обмотках

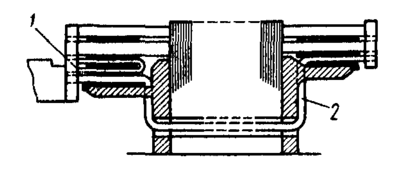


Рис. 137. Расположение уравнительных соединений на якоре:
1 – уравнительные соединения первого рода, *2* – уравнительные соединения второго рода

части секции (точка *а*), выводные концы которой впаяны во 2 и 4-ю пластины. Потенциал точки «*а*» будет равен среднему потенциалу 2 и 4-ой пластин, поэтому напряжение $U_{к23} = U_{к34}$. Такие соединения называют уравнительными соединениями второго рода.

Как видно из рис. 136, установка уравнительных соединений второго рода сопряжена с рядом технологических и конструктивных трудностей, так как лобовые части секций, которые нужно соединить с пластинами, находятся на противоположной от коллектора стороне якоря. Эти соединения выполняют изолированными проводами, пропущенными под сердечником через отверстия во втулке якоря или через осевые вентиляционные каналы (рис. 137).

В сложных петлевых обмотках помимо уравнительных соединений второго рода необходимо устанавливать также и уравнительные соединения первого рода для каждой из простых обмоток, составляющих сложную. Необходимость установки уравнительных соединений второго рода по тем же причинам возникает и в сложных волновых обмотках. При нечетном числе пар полюсов в машине их приходится выполнять так же, как и в сложных петлевых обмотках, т. е. соединять пластины коллектора с лобовыми частями секций, находящихся на стороне, противоположной коллектору. При четных числах пар полюсов уравнительные соединения второго рода в сложных волновых обмотках располагаются со стороны коллектора, соединяя коллекторные пластины с шагом $2K/p$. Поясним это на примере

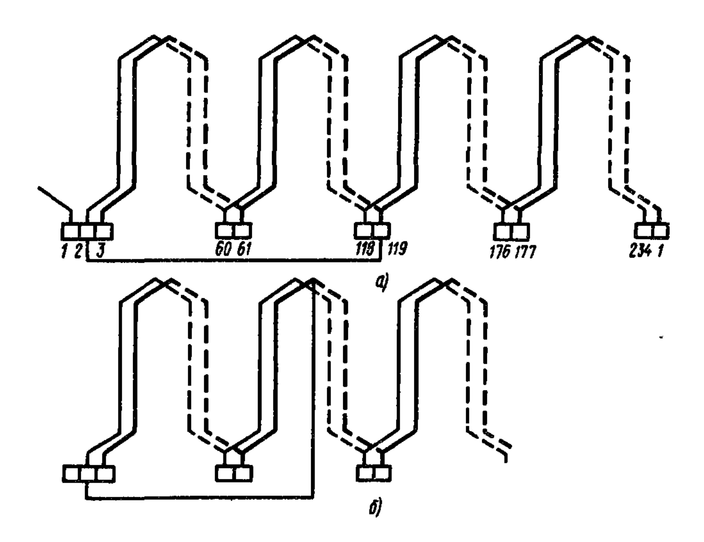


Рис. 138. Уравнительные соединения второго рода в сложной волновой обмотке:

а – при $2K/p$ = целому числу, *б* – при $2K/p \neq$ целому числу

сложной волновой обмотки с $K = 234$, $2p = 8$ и $m = 2$ (рис. 138, *а*). Проследим соединения секций обмотки, начиная с 3-ей коллекторной пластины. После четырех шагов (p шагов) волновая обмотка придет к первой коллекторной пластине ($3 - m = 3 - 2 = 1$). Со второй коллекторной пластиной соединена другая ветвь волновой обмотки. Чтобы напряжения между коллекторными пластинами $U_{к12}$ и $U_{к23}$ были одинаковы, 2-ю пластину надо соединить со средней точкой ветви, идущей от 3-ей пластины к 1-ой. Такой точкой будет пластина коллектора, расположенная через $p/2 = 4/2 = 2$ шага или через $2K/p$ коллекторных делений от 2-ой пластины. В нашем примере это расстояние выражается целым числом коллекторных делений

$\left(\frac{2K}{p} = \frac{2 \cdot 234}{4} = 117\right)$ и 2-я пластина соединяется с 119-й

$(2 + 117)$ пластиной коллектора. Если $2K/p \neq$ целому числу, то средняя точка ветви находится на лобовой части со стороны, противоположной коллектору (рис. 138, *б*).

§ 48. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

Якоря машин постоянного тока мощностью до 100–120 кВт почти всегда делают с простыми волновыми обмотками, так как в них не требуются уравнительные соединения. Но простые волновые обмотки могут быть выполнены симметричными только при определенном соотношении чисел пазов, полюсов и секций в каждом пазу, так как шаг обмотки по коллектору должен быть обязательно выражен целым числом коллекторных делений:

$$y_к = \frac{K \mp 1}{p} = \text{целому числу.}$$

Поэтому если число пластин коллектора и число пар полюсов в машине четные, то $y_к$ – не целое число и обмотка не может быть выполнена симметричной. В машинах средней мощности обычно $2p = 4$, следовательно, $p = 2$ и простая волновая обмотка может быть выполнена только при условии, что число пластин коллектора равно нечетному числу. Следовательно, должны быть также нечетными число пазов якоря Z и число секций в пазу $u_п$, так как $K = Zu_п$.

Рассмотрим, как выполняется простая волновая обмотка в наиболее распространенных четырехполюсных машинах, в которых не удается разместить в пазах нечетное число сторон секций $u_п$. Примем, что по расчету в якоре машины с $2p = 4$ должен быть 31 паз и в каждом пазу четыре стороны секций ($u_п = 4$). Число коллекторных пластин в этом случае получается четным: $K = Zu_п = 31 \cdot 4 = 124$ и

$$y_к = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{124 \mp 1}{2} \neq \text{целому числу.}$$

Изменение $u_п$ до ближайшего нечетного числа ($u_п = 3$ или $u_п = 5$) приводит к сильному (на 25 %) уменьшению или увеличению числа всех витков обмотки якоря, что, как показывает расчет, для данной машины неприемлемо. В таких машинах выполняют волновую обмотку с «мертвой» секцией. Так называют обмотку, в которой число коллекторных пластин на единицу меньше, чем число секций в обмотке: $K = Z \cdot u_п - 1$, т. е. нечетно, так как $Z \cdot u_п$ – четно. Лишняя секция укладывается в пазы, но не соединяется с коллектором и не участвует в работе машины. Ее называют «мертвой». Шаги такой обмотки рассчиты-

вают как для обычной волновой обмотки, так как число коллекторных пластин нечетно. В нашем примере $K = Zu_п - 1 = 31 \cdot 4 - 1 = 123$;

$$y_к = \frac{K - 1}{p} = \frac{123 - 1}{2} = 61; \ y_1 = 32; \ y_2 = 29.$$

Шаг y_1 выбран равным 32, потому что при $y = 30$ обмотка будет ступенчатой, так как $y_1/u_п = 30/4 \neq$ целому числу. «Мертвую» секцию можно было бы вообще не укладывать в пазы якоря, но в этом случае нужно специально закреплять каким-либо образом стороны других секций, расположенные в этих пазах. Кроме того, отсутствие одной секции в обмотке нарушит равновесие и вызовет вибрацию при вращении якоря. Поэтому в таких обмотках предпочтительнее уложить «мертвую» секцию в пазы, не нарушая общего технологического процесса укладки обмотки. Выводные концы «мертвой» секции подрезают и изолируют. Остальные секции соединяют с коллекторными пластинами в обычном порядке.

На рис. 139 приведена схема волновой обмотки с «мертвой» секцией для якоря, у которого $Z = 18$ $y_к = \frac{18 \mp 1}{2} \neq$ целому числу, но коллектор выполнен с числом пластин на единицу меньше числа секций, т. е. $K = 18 - 1 = 17$. Поэтому шаг обмотки по коллектору взят равным

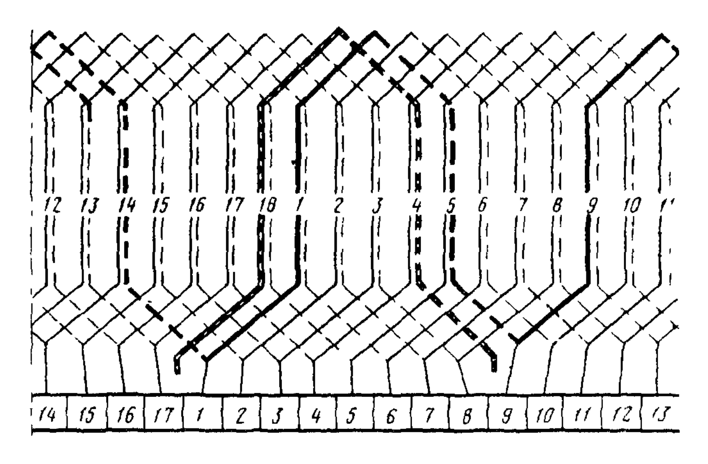


Рис 139. Волновая обмотка с «мертвой» секцией с $Z = 18$, $u_п = 1$, $K = 17$

$y_к = \frac{17-1}{2} = 8$; $y_1 = 4$ и $y_2 = 4$. На схеме обмотки «мертвая» секция расположена в 18-м (верхняя сторона) и 4-м (нижняя сторона) пазах. Ее концы не присоединены к коллектору. Остальные секции соединены с пластинами коллектора по рассчитанным шагам. Наличие «мертвой» секции приводит к некоторой электрической асимметрии обмотки. При небольшом числе секций она более заметна, поэтому в практике волновые обмотки с «мертвой» секцией применяют лишь в якорях, число секций и коллекторных пластин которых близко или более ста.

§ 49. КОМБИНИРОВАННЫЕ (ЛЯГУШАЧЬИ) ОБМОТКИ

В якорях с петлевыми обмотками необходимо устанавливать уравнительные соединения; это значительно усложняет процесс укладки обмотки и приводит к дополнительному расходу обмоточной меди. В то же время в машинах с большим током якоря не удается выполнить простые волновые обмотки, так как число параллельных ветвей в них равно только двум. Чтобы увеличить число параллельных ветвей и не устанавливать уравнительных соединений, в якорях машин с большим номинальным током иногда применяют комбинированную обмотку, состоящую из секций и волновой и петлевой обмоток. По внешнему виду (рис. 140) катушка такой обмотки несколько напоминает лягушку, поэтому обмотки получили название лягушачьих.

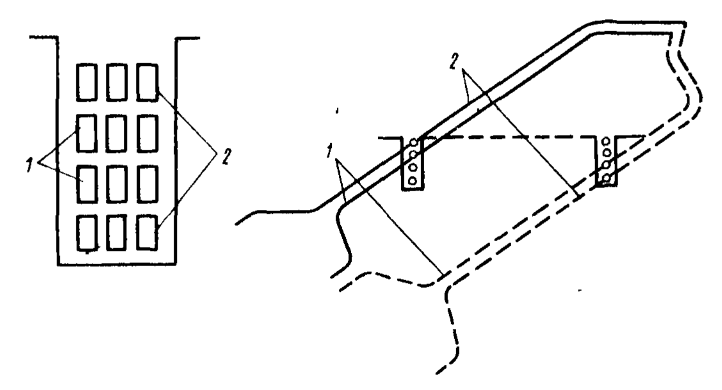


Рис. 140. Катушка лягушачьей обмотки:
1 – секция петлевой обмотки, *2* – секция волновой обмотки

В каждом пазу лягушачьей обмотки стороны секций располагаются в четыре слоя: стороны секций петлевой обмотки *1* – в средних, а волновой *2* – в нижнем и верхнем слоях. К каждой коллекторной пластине присоединены четыре выводных конца секций – два волновой и два петлевой.

Лягушачья обмотка представляет собой параллельное соединение волновой и петлевой обмоток, поэтому и в той и в другой обмотке должно быть одинаковое число проводников и параллельных ветвей. Так как в петлевой обмотке число параллельных ветвей $2a_п = 2pm_п$, а в волновой $2a_в = 2m_в$, то волновая обмотка должна быть обязательно сложной. Если лягушачья обмотка строится на базе простой петлевой обмотки ($2a_п = 2p$), то волновая обмотка должна быть $m_в = p$ ходовой, тогда $2a_в = 2p$, как и в петлевой. Так, для четырехполюсной машины с лягушачьей обмоткой петлевая имеет четыре параллельные ветви, а волновая должна быть двухходовой, тогда в ней также будет $2a_в = 2m_в = 2 \cdot 2 = 4$ параллельные ветви. Общее число параллельных ветвей всей обмотки якоря в этом случае будет $2a = 2a_п + 2a_в = 4 + 4 = 8$.

В более сложных лягушачьих обмотках за базовые принимают сложные петлевые обмотки, имеющие $2a_п = 2pm_п$ параллельных ветвей. В этих случаях волновые обмотки должны быть выполнены с $2a_в = 2pm_п$ параллельными ветвями, т. е. число ходов волновой обмотки должно равняться $m_в = pm_п$.

Рассмотрим шаги секций в лягушачьей обмотке, выполненной на базе простой волновой обмотки (рис. 141). Секция простой петлевой обмотки *a b–c* имеет шаг по коллектору $y_{кп} = 1$ Шаг по коллектору волновой обмотки (секция *c–d–e*) – $y_{кв}$ должен быть таким, чтобы в сумме с $y_{кп}$ он был бы равен шагу уравнительных соединений первого рода для простой петлевой обмотки, т. е. $y_{кв} + y_{кп} = K/p$. Суммы первых частичных шагов обеих обмоток должны быть также равны шагу уравнительных соединений: $y_{1п} + y_{1в} = Z_э/p$, т. е. двойному полюсному делению.

Стороны секций лягушачьей обмотки и соединительные шины между одноименными щетками образуют (см. рис. 141) замкнутый контур *а – в – с – d – е – а*, в котором при неравенстве эдс в ветвях могут возникнуть уравнительные токи. При правильном выборе шагов стороны секций *а – в* и *е – d* находятся на расстоянии 2τ зубцовых деления, т. е. в одинаковых магнитных условиях. Стороны секций

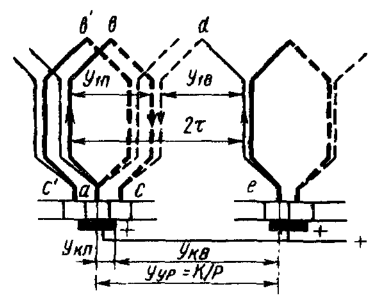


Рис 141. Элемент схемы лягушачьей обмотки

$c-в$ и $c-d$ также находятся в одинаковых магнитных условиях, так как расположены в одном пазу. Поэтому суммарная эдс контура, равная сумме всех эдс сторон секций его составляющих (показаны стрелками на рис. 141), равна нулю и уравнительные токи не возникают.

В то же время ветвь $a-в-c-d-e$ имеет шаг уравнительного соединения первого рода для простой петлевой обмотки (его шаг $y_{ур}=K/p$), а точка a является средней в двух последовательно соединенных секциях петлевой обмотки $c'-в'-a$ и $a-в-c$ и делит напряжение между коллекторными пластинами c и c' пополам. Таким образом, ветвь $a-в-c$ является уравнительным соединением второго рода для сложной волновой обмотки. Отсюда видно, что лягушачья обмотка хотя и состоит из петлевой и сложной волновой обмоток, но не требует установки специальных уравнительных соединений, поэтому она проще в изготовлении и дешевле, чем сложная петлевая обмотка, и в то же время имеет большое число параллельных ветвей.

§ 50. УСЛОВИЯ СИММЕТРИИ ОБМОТОК

Обмотка якоря будет симметричной в том случае, если при любом положении якоря относительно полюсов все эдс в ее параллельных ветвях будут одинаковы. Сопротивления параллельных ветвей также должны быть одинаковы. В этом случае и токи в ветвях будут одинаковы. Если же эдс, наводимая в какой-либо параллельной ветви, больше, чем в другой, то возникнет уравнительный ток, который будет перегружать обмотку якоря и щеточные контакты. Он появится не только при работе машины под нагрузкой, но и при холостом ходе. В генераторе с несимметричной обмоткой уравнительный ток возникнет даже при отключенной линии, так как он замыкается между параллельными ветвями через щеточные контакты и соединительные шины между одноименными щетками.

Равенство сопротивлений параллельных ветвей обеспечивается правильным выполнением и укладкой в пазы катушек и хорошим качеством паек в соединениях выводных секций с коллекторными пластинами и в лобовых частях стержневых обмоток.

Чтобы эдс, наводимые в параллельных ветвях, были одинаковые, необходимо правильно выбирать соотношения чисел пазов, проводников в обмотке, коллекторных пластин и полюсов машин. Этот выбор определяется следующими условиями, которые называют условиями симметрии обмоток.

1. Число проводников во всех пазах якоря должно быть одинаково. Так как все секции обмотки имеют одинаковое число витков, то это условие определяет, что в каждом пазу должно находиться одинаковое число секционных сторон $u_{п}$.

2. Каждая пара параллельных ветвей обмотки должна быть расположена в одинаковом числе пазов, т. е. Z/a = целому числу (напомним, что число параллельных ветвей в обмотках якоря обозначаем $2a$).

3. Каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число секций. Так как число секций равно числу коллекторных пластин, то это условие можно записать следующим образом: K/a = целому числу.

4. Число полюсов машины, деленное на число пар параллельных ветвей, должно быть целым, т. е. $2p/a$ = целому числу. При соблюдении этого условия каждой стороне секции в одной из параллельных ветвей будут соответствовать стороны секций в других парах параллельных ветвей, находящиеся в одинаковых с ней магнитных условиях. Другими словами, если сторона какой-либо секции в данный момент времени находится, например, под серединой северного полюса, то в других парах параллельных ветвей стороны соответствующих ей секций должны находиться также под серединами северных полюсов машины. Напомним, что в простых петлевых обмотках, имеющих несколько пар параллельных ветвей, между такими секциями устанавливают уравнительные соединения.

Рассмотрим, как эти условия соблюдаются в различных обмотках и какие ограничения необходимо соблюдать при выборе чисел пазов и коллекторных пластин.

В простой петлевой обмотке $2a = 2p$, поэтому четвертое условие соблюдается всегда, так как $2p/a = 2$, а второе и третье условия требуют, чтобы число пазов и число кол-

лекторных пластин были кратны числу пар полюсов, т. е. чтобы на каждую пару полюсов приходилось целое число пазов якоря и пластин коллектора. Первое условие должно быть также соблюдено.

В сложных петлевых обмотках число параллельных ветвей $2a = 2pm$, поэтому четвертое условие может быть соблюдено только при $m = 2$, т. е. только в двухходовой обмотке Если $m > 2$, то $2p/a = 2p/pm < 1$ и четвертое условие невыполнимо. Второе и третье условия в сложной двухходовой петлевой обмотке выполняются только при четном числе пазов и коллекторных пластин, так как при $m = 2$ число пар параллельных ветвей в ней будет четным ($a = pm$).

Как было разобрано выше, двухходовая петлевая обмотка при четном числе пазов и коллекторных пластин будет двукратнозамкнутая, т. е. будет состоять из двух самостоятельных простых петлевых обмоток.

На практике применяют также двухходовые петлевые обмотки с нечетным числом пазов и коллекторных пластин, т. е. однократнозамкнутые, которые, несмотря на некоторую асимметрию, работают вполне удовлетворительно. Первое условие для сложной петлевой обмотки должно быть обязательно выполнено.

В простой волновой обмотке $2a = 2$, следовательно, $a = 1$, поэтому второе, третье и четвертое условия симметрии выполняются всегда. Первое условие не выполняется только в обмотках с «мертвой» секцией, однако при большом числе коллекторных пластин несимметрия обмотки оказывается незначительной. Для сложных волновых обмоток должны соблюдаться все четыре условия симметрии.

§ 51. ПОРЯДОК РАЗМЕТКИ ЯКОРЯ ПОД ОБМОТКУ

Выводные концы секций обмотки якоря должны быть присоединены к коллекторным пластинам, расположенным симметрично относительно оси секции на расстоянии шага по коллектору друг от друга. Поэтому во всех машинах постоянного тока перед укладкой обмотки производят разметку пазов и пластин коллектора. Якорь и коллектор размечают только для одной из секций обмотки. Все остальные секции соединяют с коллекторными пластинами по мере укладки обмотки.

Существует несколько способов разметки якоря под

обмотку. Наиболее удобно в практическом отношении производить разметку как петлевой, так и волновой обмотки от оси симметрии первого паза, в который закладывается нижняя сторона первой катушки. Этот паз определяют, руководствуясь следующим правилом. Если из двух чисел, характеризующих данную обмотку, $u_п$ (число сторон секций в пазу) и y_2 (второй частичный шаг обмотки по элементарным пазам) одно четное, а другое нечетное, то за первый принимают паз, ось симметрии которого совпадает с осью симметрии одной из пластин коллектора. Если же оба эти числа ($u_п$ и y_2) четные или оба нечетные, то за первый принимают паз, ось симметрии которого совпадает с изоляцией между коллекторными пластинами — миканитовой прокладкой. Выбранный паз отмечают с обеих сторон краской или засечками керном на торце якоря, так же отмечают коллекторную пластину. После этого рассчитывают, к какой коллекторной пластине должны быть присоединены выводы секций катушки, сторона которой укладывается в первый паз. Расстояние этой коллекторной пластины до оси паза удобнее выражать в целых коллекторных делениях. Расчет проводят для одной из секций, входящих в первую катушку. Если число секционных сторон в пазу нечетное, то расчет проводят для средней секции, если четное, то для секции, сторона которой занимает ближайшее положение справа от оси паза. В тех случаях, когда ось паза совпадает с коллекторной пластиной при нечетном числе $u_п$ и четном шаге y_2, между осью первого паза и коллекторной пластиной, к которой должен быть присоединен вывод средней секции, должно находиться $y_2/2$ целых коллекторных пластин. Коллекторная пластина, совпадающая с осью паза и разделенная ею пополам, в это число не входит. Для петлевой обмотки отсчет ведут в направлении укладки катушек в пазы якоря (в направлении к верхней стороне первой катушки), а для волновых обмоток — в противоположном направлении.

При четном числе $u_п$ и нечетном шаге y_2 между осью первого паза и коллекторной пластиной, к которой должен быть присоединен выводной конец секции, должно быть в петлевых обмотках $\frac{y_2 - 1}{2} - 1$, а в волновых обмотках $\frac{y_2 - 1}{2} + 1$ целых коллекторных пластин.

Когда ось паза совпадает с изоляцией между пласти-

нами при иечетных числах $u_п$ и y_2, между осью паза и соединенными с выводами пластинами и в петлевой и в волновой обмотках должно быть $\frac{y_2 - 1}{2}$ целых коллекторных пластин, а при четных числах $u_п$ и y_2 в петлевой обмотке $1/2\ y_2 - 1$ и в волновой $1,2\ y_2 + 1$ целых коллекторных пластин. Отсчет пластин, так же как и раньше, для петлевых и волновых обмоток производится в противоположных направлениях. Перечисленные выше случаи и соответствующие им формулы сведены в табл. 8, используя которую, разберем пример разметки якоря для укладки петлевой и волновой обмоток

Таблица 8 **Разметка якоря**

Число секций в катушке $u_п$	Второй частичный шаг по элементарным пазам y_2	Число целых коллекторных пластин между осью симметрии первого паза и пластиной, соединенной с выводом средней секции первого паза		Выбор первого паза
		при петлевой обмотке	при волновой обмотке	
Нечетное	Четный	$\frac{1}{2} y_2$	$\frac{1}{2} y_2$	Первый паз
Четное	Нечетный	$\frac{y_2 - 1}{2} - 1$	$\frac{y_2 - 1}{2} + 1$	
Нечетное	Нечетный	$\frac{y_2 - 1}{2}$	$\frac{y_2 - 1}{2}$	Первый паз
Четное	Четный	$\frac{1}{2} y_2 - 1$	$\frac{1}{2} y_2 + 1$	

Пример. Разметим якорь, у которого $Z = 31$, $2p = 4$, $K = 102$, для укладки простой петлевой обмотки с $u_п = 3$ Шаги обмотки $y_1 = 27$, $y_2 = 25$, $y_к = 1$, $y_t = 9$ Числа $u_п = 3$ и $y_2 = 25$ – оба нечетные, следовательно, необходимо отыскать в якоре паз, ось которого наиболее точно совпадает с изоляцией между пластинами коллектора В табл 8 для $u_п$ и y_2 нечетных находим, что расстояние между осью паза и коллекторной пластиной, с

которой должен быть соединен выводной конец средней секции, в петлевой обмотке равно $\frac{y_2 - 1}{2} = \frac{25 - 1}{2} = 12$ Отсчитываем от

оси паза 12 пластин К следующей в направлении отсчета пластине должен быть присоединен вывод секции. Так как сторона секции занимает второе справа место в пазу, то ей удобно присвоить № 2 элементарного паза Такой же номер присваиваем коллекторной пластине, с которой соединяется начальный вывод секции Конец секции соединяется с коллекторной пластиной № 3 Выводы первой секции катушки соединяются с пластинами *1* и *2*, а последней секции – с пластинами *3* и *4*

§ 52. УКЛАДКА ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Процесс укладки обмотки якоря на заводах с крупносерийным производством механизирован. При мелкосерийном производстве и на ремонтных заводах всыпная обмотка в большинстве случаев укладывается вручную. Также укладывают обмотку якоря из прямоугольных проводов.

Во время подготовки якоря к укладке обмотки обмотчик, установив якорь на стойки, должен проверить качество сборки его магнитопровода. Особое внимание нужно обратить на состояние внутренней поверхности пазов, на которой не должно быть выступающих кромок листов стали и заусенцев. Далее производят разметку якоря в зависимости от шагов обмотки и числа секций в катушке (см § 51). Пазы и коллекторные пластины, к которым должны быть присоединены выводные концы первой секции, отмечаются на торцах якоря и коллектора керном. Обмоткодержатели изолируют двумя-тремя слоями нарезанного полосами гибкого изоляционного материала (микаинита, стекломиканита), нагревостойкость которого соответствует классу нагревостойкости изоляции обмотки. Полосы обертывают по периметру обмоткодержателей и закрепляют двумя-тремя слоями стеклянной ленты, намотанной вполнахлеста. Лобовые части всыпной обмотки располагаются вплотную к торцам, поэтому торцевые части якоря изолируются электронитовыми шайбами, имеющими такую же конфигурацию, как и листы стали якоря.

Далее приступают к изолированию пазов якоря. В овальные полузакрытые пазы (при всыпной обмотке) устанавливают пазовые короба из одного-двух слоев изофлекса при изоляции класса нагревостойкости B или двух слоев имидофлекса при изоляции классов F и H. В открытые пазы (при обмотке из прямоугольного провода) на дно

пазов укладывают прокладки из стеклотекстолита толщиной 0,5 мм, которые предохраняют корпусную изоляцию катушек от возможных повреждений о неровности дна пазов при сильном нажатии во время заклинивания. Эти прокладки на 8–12 мм длиннее, чем якорь, и выступают из его пазов по обоим торцам. Чтобы прокладки не сбивались во время укладки обмотки, их закрепляют лентой с обоих торцов якоря. Пазовые короба устанавливают также и в открытые пазы якоря, несмотря на то, что корпусная изоляция обмоток из прямоугольных проводов накладывается на катушки в процессе их изготовления. В этих случаях пазовые короба служат для предохранения изоляции катушек от повреждения о стенки пазов. Их выполняют из тонкого и механически прочного изоляционного материала – стеклолакоткани или фениловой бумаги толщиной 0,15–0,2 мм.

Укладку обмотки начинают с первого отмеченного паза, в который устанавливают нижнюю сторону катушки. Ее верхнюю сторону располагают над пазом по шагу обмотки. Лобовые части катушки выравнивают и нижнюю сторону осаживают на дно первого паза, ударяя по ней молотком через подбойку. После этого необходимо распределить выводные концы секций катушки по коллекторным пластинам. Это ответственный момент при укладке обмотки, так как от расположения выводных концов первой секции зависит правильность выполнения всей обмотки, потому что секции остальных катушек укладываются аналогично первой. Руководствуясь практической схемой, обмотчик вкладывает выводные концы первой секции в прорези петушков коллекторных пластин, отмеченных при разметке якоря. Выводные концы второй секции располагаются в прорезях следующих по ходу укладки пластин. В катушках из прямоугольного провода выводные концы каждой секции находят легко. Во всыпной обмотке концы секции обязательно маркируют при намотке катушек. Если маркировки почему-либо нет, то для нахождения выводных концов одной и той же секции приходится использовать контрольную лампу или другой аналогичный прибор с индикатором.

После соединения выводных концов секций первой катушки с коллекторными пластинами устанавливают вторую катушку. Ее стороны располагают рядом со сторонами первой катушки: нижнюю осаживают на дно паза, а верхнюю оставляют над пазом. Выводные концы вставляют в про-

рези петушков, следующих по ходу обмотки коллекторных пластин. Так поступают, пока не уложены первые «шаговые» катушки. Число их равно шагу обмотки по пазам y_z. Следующая катушка укладывается уже обеими сторонами в пазы якоря. Ее верхняя сторона располагается в первом пазу, нижняя половина которого уже занята стороной первой катушки. Перед укладкой верхних сторон катушки, находящиеся в нижних частях пазов, уплотняются и на них устанавливают прокладку.

Во всыпных обмотках межслойную прокладку делают из того же материала, что и пазовый короб. Она служит изоляцией между витками различных катушек. В обмотках из прямоугольного провода эта прокладка имеет технологическое назначение. Она создает определенное расстояние по высоте между сторонами катушек, находящихся в разных слоях, необходимое для правильного размещения их лобовых частей в местах выхода из пазов. Эти прокладки обычно выполняют из стеклотекстолита толщиной 0,5 мм. Аналогичный порядок укладки сохраняется до конца намотки. Нижние стороны последних катушек размещают под оставшимися не уложенными сторонами первых катушек. Для этого приходится их приподнять, несколько деформируя лобовые части, как и при «закрывании замка» двухслойных обмоток статора.

После укладки обмотки пазы якоря заклинивают, а если предусмотрено крепление обмотки бандажами, передают на бандажирование.

Всыпные обмотки якорей небольших диаметров (приблизительно до 150 мм) наматывают непосредственно в пазы. Лобовые части таких обмоток плотно прижимаются к валу машины и к торцам якоря, поэтому эти участки перед укладкой изолируют (рис. 142). На участки вала наносят несколько слоев изоляционного ленточного материала *1*, а на торцах якоря располагают электронитовые шайбы *2*, имеющие форму и размеры листов стали якоря. Пазы якоря изолируют пазовыми коробами *3*. Обмотку выполняют без подъема шага: первые шаговые катушки обеими сторонами укладывают на дно пазов, последние — обеими сторонами в верхнюю часть пазов. Лобовые части обмотки при этом распределяются неравномерно: у первых катушек они прижимаются к торцам якоря и к валу, а у последних — располагаются в верхнем слое. Более равномерное распределение лобовых частей получается при так называемых хордовых обмотках. В таких обмотках витки

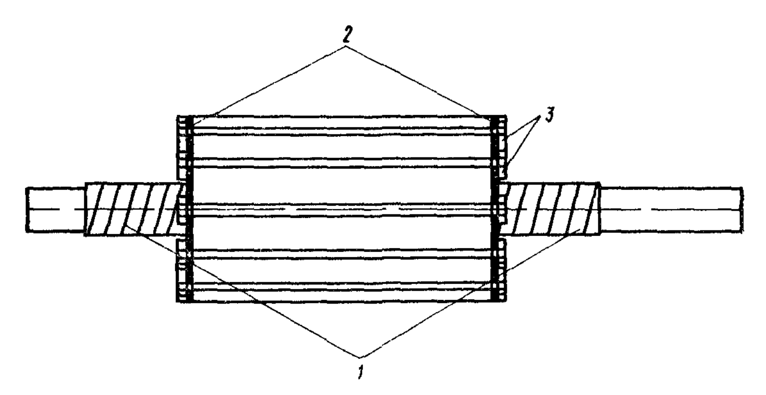


Рис 142 Изоляция якоря машины малой мощности перед укладкой обмотки

катушек наматывают одной стороной в один паз, а другими сторонами — в два разных паза, в каждый из них по половине витков катушки. На рис. 143 показана последовательность обмотки якоря, имеющего девять пазов Половина витков первой катушки наматывается из 1-го паза в 5-й, а вторая половина — из 1-го паза в 6-й. Таким образом, витки первой катушки занимают половину

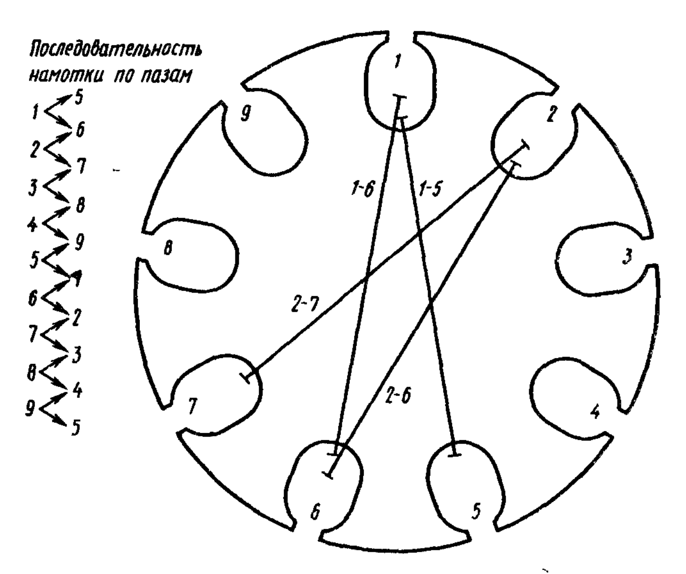


Рис 143 Последовательность намотки хордовой обмотки

1-го паза и по $^1/_4$ 5-го и 6-го. Половину витков следующей катушки наматывают из 2-го паза в 6-й и половину из 2-го паза в 7-й, третью катушку — из 3-го паза в 7-й и в 8-й и т. д. После полного обхода все пазы оказываются заполненными нужным числом проводников обмотки. Такой способ обеспечивает бо́льшую симметрию расположения обмотки на якоре, чем укладка по обычной схеме.

В настоящее время на большинстве заводов укладка всыпной обмотки якорей механизирована. Существует несколько типов станков для механизированной обмотки якорей. По способу образования витка обмотки станки подразделяются на челночные и бесчелночные. В бесчелночных станках витки обмотки образуются при вращении якоря вокруг оси, перпендикулярной валу, в челночных — в результате движения поводка (челнока) вокруг якоря.

Якорь 1 намоточного челночного станка (рис. 144) устанавливается в кулачковых держателях *2*. Обмоточный провод *7* пропускается через полую ось шпинделя станка и ролики, укрепленные на поводке *8*, и закрепляется на якоре. Якорь удерживается в неподвижном положении фиксатором *6*, входящим в паз якоря. При работе станка поводок, двигаясь вокруг якоря, укладывает обмоточный провод, который соскальзывает с направляющей поверхности держателей в пазы якоря. По окончании намотки

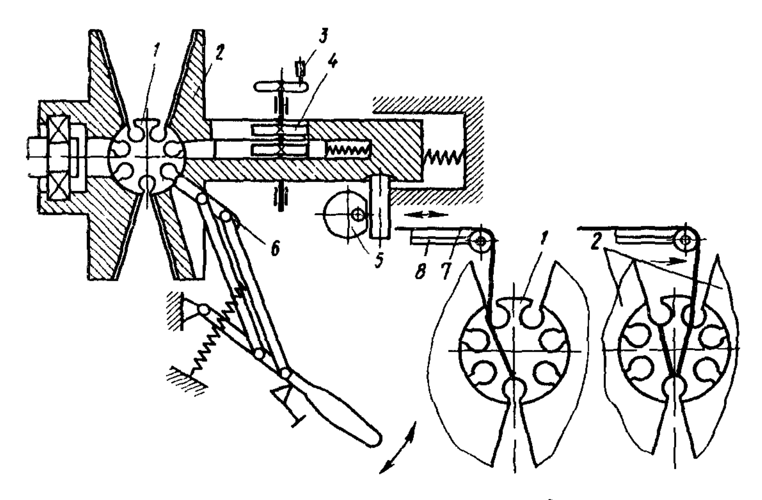


Рис. 144. Намотка хордовой обмотки якоря на челночном станке

ные силы, действующие на пластины коллектора, увеличиваются и крепление пластин нажимными конусами становится недостаточным. В этих случаях применяют коллекторы с бандажными кольцами (рис. 147). Бандажные кольца *2* в горячем состоянии насаживаются на собранные в кольцо коллекторные пластины *3* и зажимают их. В месте посадки устанавливают механически прочные изоляционные прокладки *1*. Ласточкины хвосты у пластин таких коллекторов не нужны, поэтому общая высота пластин уменьшается, однако расход меди в коллекторах с бандажными кольцами больше, чем в коллекторах с нажимными конусами. Это происходит из-за того, что большая часть рабочей поверхности коллекторов занята под посадку бандажных колец. Поэтому коллекторы с бандажными кольцами применяют только в быстроходных машинах, в которых нельзя установить коллекторы с нажимными конусами.

В последние годы с целью упрощения технологии изготовления коллекторов и уменьшения расхода дорогостоящей изоляции нажимных конусов коллекторы в машинах малой и частично средней мощности выполняют на пластмассе (рис. 148). Пластины таких коллекторов с проложенной между ними изоляцией собирают в оправку, обжимают и запрессовывают в пластмассу, обладающую высокими механическими свойствами. Обычно применяют пластмассу АГ4 или АГ4С с наполнителем из стеклян-

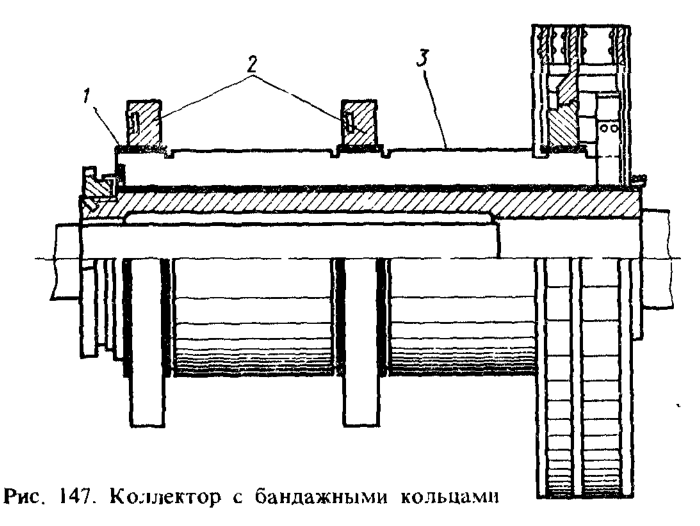


Рис. 147. Коллектор с бандажными кольцами

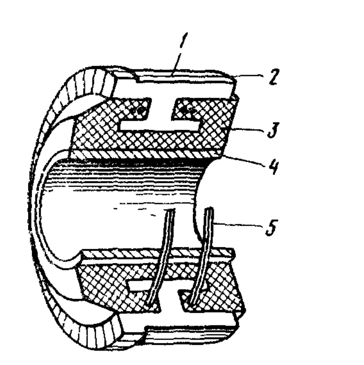


Рис 148. Коллектор на пластмассе:

1 — коллекторная пластина, 2 — изоляционная прокладка между пластинами, 3 — пластмассовый корпус, 4 — втулка, 5 — армировочное кольцо

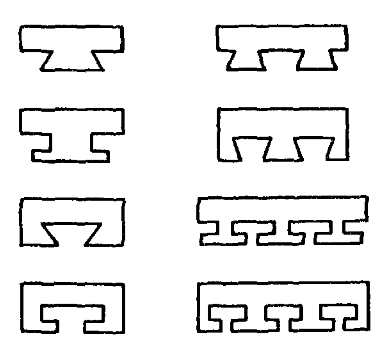


Рис. 149. Пластины с различными крепежными выступами для коллекторов на пластмассе

ного волокна. Пластины таких коллекторов могут иметь различную конфигурацию (рис. 149), при которой обеспечивается плотное закрепление их в пластмассе. Для усиления крепления в выемках пластин устанавливают и одновременно с пластинами запрессовывают в пластмассу стальные крепежные кольца (см. рис. 148). Конфигурация выступов пластин и количество крепежных колец зависят от размеров коллектора и частоты его вращения. Для посадки коллектора на вал одновременно с пластинами в пластмассу запрессовывают также металлическую втулку со шпоночной канавкой для крепления коллектора на валу.

Коллекторные пластины изготовляют из меди специального сорта с присадкой кадмия, имеющей повышенную стойкость на истирание. Пластины нужной длины штампуются из шин клиновидного профиля. Окончательную конфигурацию они получают после сборки на оправку, когда на токарном станке протачивают выточки ласточкина хвоста. Между пластинами прокладывают изоляцию из листового коллекторного миканита, обладающего большой механической прочностью. В коллекторах с нажимными конусами сложную форму изоляции конусов — манжетам — придают путем опрессовки разогретых листов формовочного миканита на фигурных оправках. Изоляцию втулки коллектора также делают из формовочного миканита.

Чтобы припаять выводные концы секций якоря к петуш-

кам, в последних фрезеруют прорези. Высота петушков зависит от разницы диаметров якоря и коллектора. Петушки должны располагаться примерно на уровне пазов якоря (см. рис. 34), чтобы выводные концы секций не приходилось сильно изгибать. В машинах, в которых диаметр якоря много больше, чем диаметр коллектора, петушки должны быть высокими. Для этого края пластин до сборки коллектора фрезеруют и в них впаивают полоски меди с хомутиками для соединения с концами секции – вставные петушки. Места соединений вставных петушков с пластинами должны помимо высокой электропроводности обладать также и большой прочностью. Поэтому концы петушков и прорези пластин сначала лудят, потом скрепляют заклепками и лишь после этого пропаивают. Широко применяется также пайка вставных петушков с коллекторными пластинами медно-фосфористым припоем ПМФ. Пайка этим припоем обеспечивает одновременно и хороший электрический контакт, и высокую механическую прочность места соединения.

Припайку выводных концов секций к коллекторным пластинам раньше производили оловянно-свинцовыми припоями (ПОС). Коллектор с вставленными в прорези петушков концами секций опускался вертикально в ванну с расплавленным и нагретым до 300 – 375 °С припоем, поверхность которого покрывалась слоем флюса (канифоли). По мере нагревания петушков припой затекал во все зазоры в местах соединений. После выемки коллектора из ванны и охлаждения припой застывал и обеспечивал хороший электрический контакт между концами секций и пластинами коллектора. Этот способ применяется еще и в настоящее время на некоторых заводах и в ремонтной практике, однако он имеет ряд недостатков, в частности создает недостаточную прочность соединений, особенно при нагревании коллектора во время работы машины.

Более прочное в механическом отношении соединение и более надежный электрический контакт получается при аргонно-дуговой сварке. Она основана на сплавлении петушков коллектора и выводных концов секций обмотки с помощью электрической дуги. Во время плавления зона сварки защищается от воздействия на медь кислорода воздуха инертным газом – аргоном. На рис. 150 показана принципиальная схема установки для аргонно-дуговой сварки. Сварочная головка *5* с зажатым в ней электродом *4* из вольфрамовой проволоки устанавливается вертикально

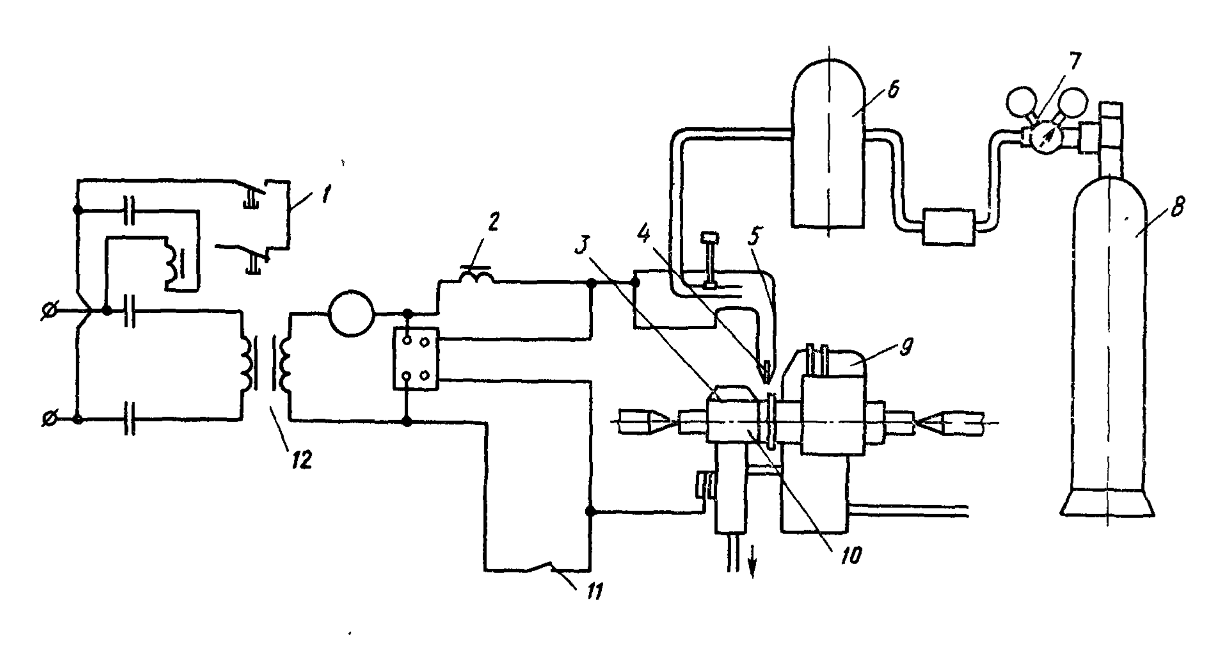


Рис. 150. Принципиальная схема установки для аргоно-дуговой сварки концов секций с петушками коллектора

или под небольшим углом над петушками коллектора *10*. Ток подается через пусковое устройство *1*, понижающий трансформатор *12* и реактор *2* на сварочную головку и коллектор при замыкании контакта *11*. Сила тока устанавливается реактором в пределах 150—300 А. Одновременно к сварочной головке из баллона *8* подается аргон через редукционный клапан *7*. Расход газа устанавливается ротаметром *6* в пределах 7—10 л/мин. При подаче напряжения между электродом и петушками коллектора возникает электрическая дуга, вызывающая нагрев петушков до высокой температуры (около 4000 С) и сплавление их с концами секций. Процесс сварки одного контакта длится около 5 с. Чтобы избежать чрезмерного нагрева коллектора и обмотки, на якорь и коллектор устанавливают герметические охлаждающие рубашки *3* и *9*, внутри которых циркулирует вода. Кроме того, часть тепла уносится струей аргона, поэтому нагрев коллектора и обмотки за короткое время сварки не успевает превысить допустимых норм. Чтобы длительность сварки одной пластины не превысила расчетную, в цепь понижающего трансформатора устанавливают реле времени, которое автоматически отключает напряжение через заданное время сварки.

В настоящее время на больших электромашиностроительных заводах разработаны и внедрены полуавтоматические станки для аргоно-дуговой сварки, в которых весь процесс сварки выводных концов секций с коллекторными пластинами автоматизирован.

Качество сварки или пайки коллекторов контролируется осмотром и с помощью приборов, позволяющих обнаружить разницу между сопротивлениями одинаковых элементов обмотки якоря, возникающую при некачественном соединении секций с коллектором.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем различаются катушки петлевых и волновых обмоток якорей?
2. Сколько пластин коллектора должно быть в якоре с $Z = 27$ и $u_п = 3$?
3. Сколько параллельных ветвей образуется в петлевой обмотке с $2p = 6$?
4. Перечислите названия шагов обмотки якоря. Что они определяют?
5. Чему может быть равен шаг по коллектору простой петлевой обмотки?
6. В каких случаях образуются ступенчатые обмотки якоря?
7. Зачем устанавливают уравнительные соединения 1-го рода?

8 Сколько параллельных ветвей в сложной двухходовой петлевой обмотке с $2p = 8$?

9. Как рассчитать шаг волновой обмотки по коллектору?

10. В каких обмотках необходимо устанавливать уравнительные соединения 2-го рода?

11 В каких случаях приходится делать волновые обмотки с «мертвой» секцией?

12. Какую обмотку называют «лягушачьей» и в каких случаях ее применяют?

13 Опишите конструкцию коллектора с нажимными конусами.

ГЛАВА XII
КРЕПЛЕНИЕ И ОТДЕЛКА ОБМОТОК

§ 54. КРЕПЛЕНИЕ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК

Проводники обмоток должны быть плотно закреплены и в пазовой и в лобовой частях, чтобы при любых режимах работы машины – во время пусков, резкого изменения нагрузки и при вибрации во время работы – они оставались неподвижными относительно друг друга и металлических частей машины, к которым они прилегают. Способы крепления проводников в пазовых и лобовых частях зависят от типа обмотки, ее места расположения (на неподвижном статоре или вращающемся роторе), от мощности машины и ее конструкции.

В процессе ручной укладки всыпной обмотки проводники в пазу уплотняются. После того как в паз уложены последние проводники, обмотчик осаживает их на дно паза. Края пазовой изоляции, выступающие из шлица, подрезаются и завертываются внутрь на проводники обмотки. В паз устанавливается прокладка и забивается пазовый клин. Правильно забитый клин должен плотно держаться в пазу и поджимать проводники обмотки к дну паза. Пазовые клинья в своем сечении повторяют конфигурацию верхней части пазов: они имеют либо полукруглое, либо трапецеидальное сечение (рис. 151, *а*). Раньше клинья делались из твердых пород дерева, преимущественно из бука, сушились и проваривались в льняном масле, чтобы уменьшить гигроскопичность дерева. В современных машинах пазовые клинья для всыпных обмоток делают большей частью из текстолита или из стеклотекстолита.

В машинах небольшой мощности заклинивание пазов производится на станках. В этом случае вместо клиньев обмотку закрепляют пазовыми крышками (рис. 151, *б*), т. е.

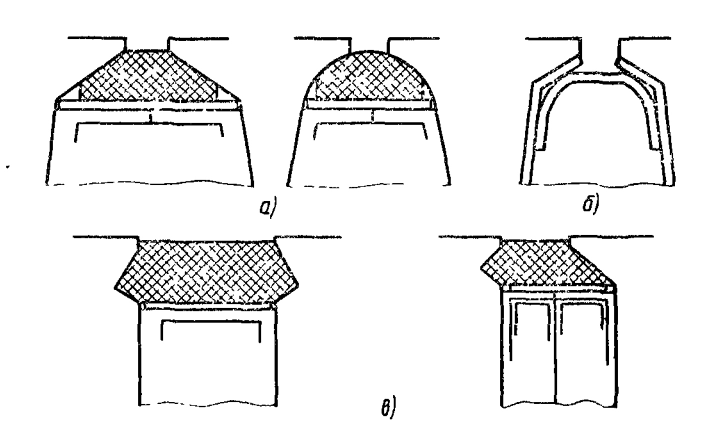


Рис 151 Крепление обмоток в пазу

а всыпных пазовым клином, *б* – всыпных пазовой крышкой, *в* обмоток из прямоугольного провода пазовым клином

полосками того же изоляционного материала, что и пазовая изоляция, но несколько большей толщины. Так, в статорах асинхронных двигателей серии 4А высотой оси вращения меньше 250 мм пазовые крышки делают из изофлекса при классе нагревостойкости изоляции В и из имидофлекса при классах F и H. Толщина крышек в машинах малой мощности 0,3 мм и при большей мощности 0,5 мм. Прокладок под крышки не устанавливают. Пазовые крышки слабее уплотняют проводники в пазу, чем клинья, но последующая пропитка обмоток цементирует уложенные провода в пазу и увеличивает жесткость крышки. Как показала практика, такое крепление всыпной обмотки достаточно надежно и в то же время может быть механизировано. Пазовые крышки устанавливаются на автоматических заклиновочных станках.

В станок (рис. 152) помещается рулон изоляционного материала *1*, ширина которого равна длине пазовой крышки Механизм подачи станка *2* периодически продвигает изоляционный материал на длину, равную ширине заготовки пазовой крышки, в формовочно-отрезной механизм, состоящий из ножей *3*, матрицы *5* и пуансона *4* Ножи отрезают полосу нужной ширины, а пуансон формует крышку в матрице Матрица одновременно служит направляющей, по которой досылатель *9* подает крышку *6* в паз статора Перед началом движения досылателя проводники *7* обмотки, находящейся в пазу, отжимаются ко дну паза толкателем *8*,

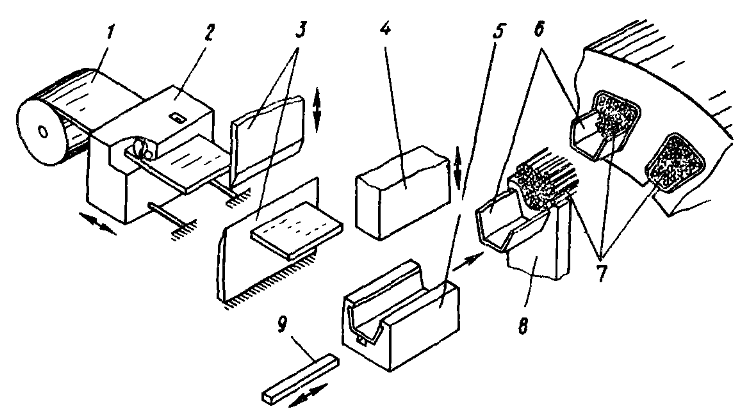


Рис 152 Схема работы станка для заклинивания пазов статора (пазовые крышки из широкой ленты)

который воздействует на лобовую часть катушки. После установки пазовой крышки статор поворачивается поворотным механизмом на одно зубцовое деление так, чтобы незаклиненный паз занял соосное положение с матрицей и находящейся в ней очередной пазовой крышкой.

В станках другого типа пазовые крышки формируются из узких полос изоляционного материала, который устанавливается в станок в виде рулона ленты, ширина которой равна ширине заготовки пазовой крышки. В этих станках (рис. 153) ролики подающего механизма *2* при подаче

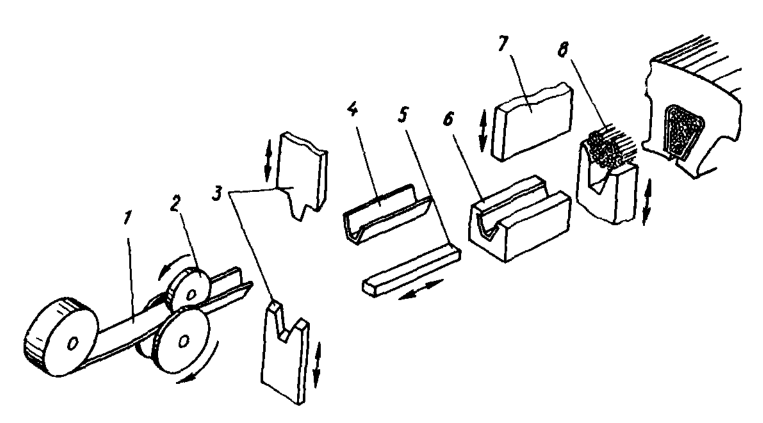


Рис 153 Схема работы станка для заклинивания пазов статора (пазовые клинья из узкой ленты)

ленты *1* в формовочно-отрезной механизм наносят на нее зиговки, соответствующие линиям изгиба пазовой крышки. После этого фигурные ножи *3* отрезают участок ленты *4*, равный длине пазовой крышки, а пуансон *7* формирует крышку в матрице *6*. Толкатель *8* отжимного механизма и досылатель *5* действуют так же, как и в станках первого типа.

Выпускаемые нашей промышленностью станки для заклинивания пазов статора носят название ЗС (от слов «заклинивание статора»). Различные модели станков предназначены для заклинивания статоров двигателей разных типов и мощности. Например, заклинивание пазов асинхронных двигателей серии 4А с внутренним диаметром статоров 65–113 мм производят на станках ЗС-11 На них можно заклинивать статоры, имеющие 24, 36 или 48 пазов. Скорость заклинивания – до 80 пазов/мин.

Лобовые части всыпных обмоток для придания им большей жесткости бандажируются. Провода всех катушек в лобовых частях плотно увязываются между собой нитью из стекловолокна или синтетических материалов. Бандажирование вручную – трудоемкая операция, требующая больших физических усилий, так как нить необходимо крепко затягивать.

Процесс бандажирования осложняется тем, что свободный промежуток между торцом статора и проводами в лобовых частях очень небольшой. Поэтому станки для бандажирования лобовых частей статора работают по принципу затягивания петель (рис. 154). Последовательные положения бандажировочной нити, иглы и петлителя обозначены цифрами *I–VI*. Между торцом статора *1* и проводами лобовой части катушки *5* проходит игла *3*, в ушко *2* которой вдета бандажировочная нить *4(I)*. Игла имеет возвратно-поступательное движение При прямом ходе она втягивает нить между торцом статора и лобовой частью (*II*). При обратном ходе (*III*) нить образует петлю *6*, которую зацепляет крючок петлителя *7*. Петлитель вытягивает нить за пределы лобовых частей и подает ее к игле (*IV*). Во время второго хода (*V*) игла проходит сквозь петлю и утягивает ее (*VI*). При возвратном движении иглы снова образуется петля, которую захватывает петлитель и т. п. Описанный способ бандажирования требует сложного хода петлителя вокруг лобовой части.

Конструкция упрощается при использовании радиусной изогнутой по окружности иглы, которая выносит петлю

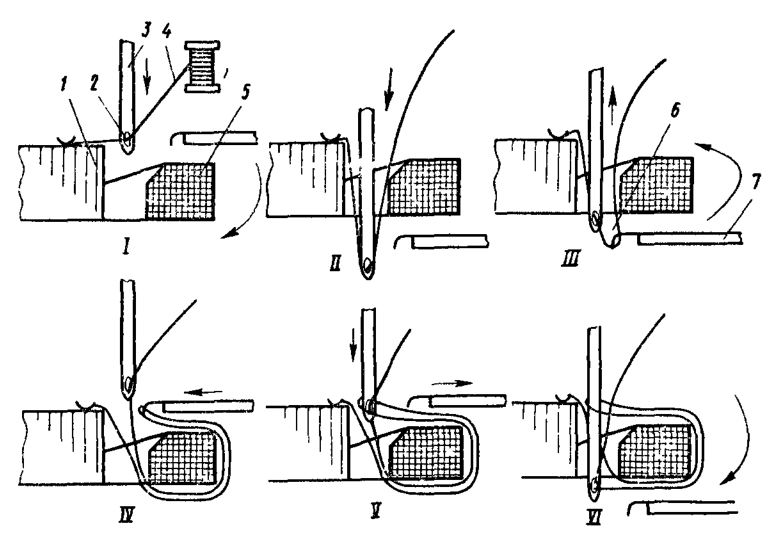


Рис 154. Принцип образования петель при бандажировании лобовых частей обмотки на станках

за пределы лобовых частей. Петлитель, захватывая нить, поднимет петлю вверх на траекторию движения иглы. При очередном повороте игла проходит сквозь петлю и затягивает виток бандажа. По такому принципу работают бандажировочные станки типа БС.

Петли бандажа накладываются в каждом из просветов между статором и лобовыми частями, т. е. против каждого зубца статора. Программное устройство станка поворачивает статор на соответствующий угол после затягивания каждого витка так, чтобы против иглы располагался зубец статора. Для того чтобы первые петли бандажа не ослабли после окончания бандажирования, в первые просветы укладывают по нескольку петель. Статор в это время остается неподвижным

§ 55. КРЕПЛЕНИЕ ОБМОТОК СТАТОРА ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

Заклинивание обмоток из прямоугольных проводов производится по мере укладки катушек в паз. Для полуоткрытых и открытых пазов (см. рис. 151, *в*) применяют клинья из стеклотекстолита, текстолита или буковые. Клинья имеют

сточенные по краям грани, соответствующие выемкам в пазах. Ширина клина должна быть такой, чтобы он входил в пустой паз без большого усилия, но плотно, задевая кромками о боковые стенки паза. Под клин обязательно устанавливаются прокладки, предохраняющие изоляцию катушек от возможного повреждения при забивании клина. Толщина прокладок под клин указывается в чертеже заполнения паза, однако обмотчику часто приходится увеличивать ее толщину, так как необходимо опытным путем подобрать толщину прокладки такой, чтобы клин туго входил на свое место. Клинья забивают с торцов статора ударами молотка Передняя нижняя кромка клина слегка скашивается, чтобы при своем движении он не сминал прокладку. Клинья обычно делают длиной не более 300 мм. Если статор машины имеет бо́льшую длину, то заклинивание производят с двух сторон двумя клиньями, каждый из которых доходит до половины длины паза. Концы установленных клиньев должны выступать с обеих сторон статора на 5—10 мм, предохраняя прямолинейные части катушек в местах их выхода из пазов.

Статоры мощных машин длиной более 600—700 мм заклинивают несколькими клиньями, каждый из которых имеет длину 200—300 мм. Первыми устанавливают средние клинья, потом ближние от них поочередно к каждому торцу статора. Статоры больших машин имеют радиальные воздушные каналы, по которым циркулирует охлаждающий воздух. Чтобы избежать ненужных завихрений воздуха, участки клиньев, расположенные над каналами, делают со скошенными кромками. Скосы фрезеруют до установки клиньев в пазы, поэтому, располагая такие клинья по длине паза, необходимо следить, чтобы скошенные участки приходились над вентиляционными каналами.

В статорах большой длины составными делают не только клинья, но и прокладки под них, причем стыки прокладок не должны совпадать со стыками клиньев. Если, заклинивая длинные пазы, с самого начала забивать клинья с нужным натягом, то пока клин дойдет до своего окончательного места, его кромки срежутся о стенки паза. Поэтому средние клинья закладывают в пазы сначала без прокладок и продвигают их к середине статора без натяга. Лишь на расстоянии, несколько большем, чем длина клина, в пазы под клин устанавливают прокладки и последний участок клина забивают с нужным натягом.

В обмотках, выполненных из прямоугольного провода, лобовые части располагаются не вплотную друг к другу, как во всыпных, а с промежутками, через которые проходит охлаждающий воздух. Размер промежутков указывается в чертеже обмотки. Для того чтобы укрепить лобовые части и сделать все промежутки одинаковыми, между лобовыми частями катушек устанавливают дистанционные прокладки из твердого материала (гекстолита, гетинакса или другого материала). Прокладки плотно привязываются к лобовым частям катушек в один или два ряда (рис. 155). Место установки дистанционных прокладок, их размер и количество витков шнура для увязки каждой из них указываются в технологической карте. Увязанные лобовые части образуют прочную в механическом отношении систему, а между лобовыми частями катушек остается свободное пространство для прохода охлаждающего воздуха.

В машинах с большим вылетом лобовых частей обмотки дополнительно крепятся к бандажным кольцам (рис. 156). Бандажные кольца сваривают из немагнитного материала и перед установкой изолируют. Изоляция бандажных колец рассчитывается на полное напряжение обмотки, так как к ним вплотную прижимаются лобовые части катушек.

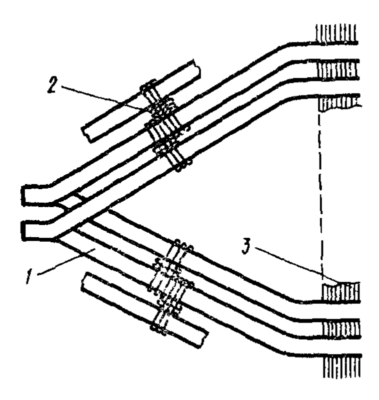


Рис 155 Установка дистанционных прокладок:

1 – лобовые части катушек, 2 – дистанционные прокладки, 3 – сталь статора

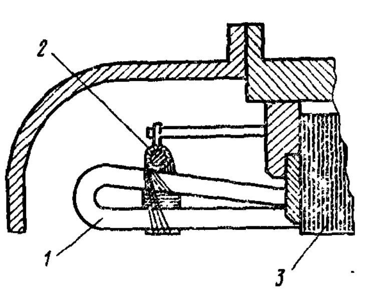


Рис. 156 Крепление лобовых частей обмотки статора бандажными кольцами:

1 – лобовые части катушек, 2 – бандажное кольцо, 3 – сердечник статора

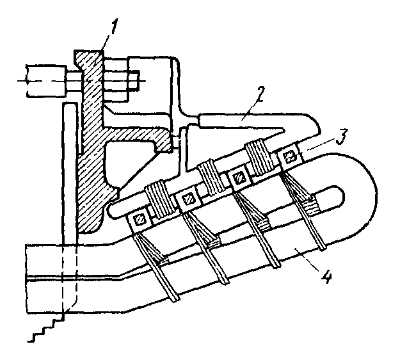


Рис. 157 Крепление лобовых частей обмотки статора турбогенератора

В сравнительно небольших машинах бандажные кольца устанавливают без стоек, в машинах большой мощности — на стойках или кронштейнах, укрепленных к нажимным плитам статора. На рис. 157 показана система крепления лобовых частей обмотки турбогенератора. Лобовые части *4* прочно прибандажированы к нескольким бандажным кольцам *3*, которые установлены на кронштейнах *2*, закрепленных на нажимной плите *1*.

§ 56. КРЕПЛЕНИЕ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ И РОТОРОВ

Закрепить обмотку в пазовых и лобовых частях на вращающемся роторе асинхронного двигателя или якоре машины постоянного тока значительно сложнее, чем на неподвижном статоре. При вращении на обмотку действуют центробежные силы, стремящиеся вытолкнуть ее из пазов и отогнуть лобовые части. Чтобы проводники оставались плотно прижатыми к дну паза при работе машины, давление клиньев на них должно быть бо́льшим, чем центробежная сила, действующая на пазовую часть обмотки. Поэтому толщину клиньев для открытых пазов якоря и фазного ротора асинхронной машины увеличивают по сравнению с клиньями для пазов статора. Последовательность установок прокладок и заклиновки пазов такая же, как и при заклинивании статорных пазов.

Лобовые части обмоток крепятся с помощью бандажей (рис. 158), которые наматываются из стальной проволоки *1* или стеклоленты с натягом, прижимающим лобовые части катушек к обмоткодержателям *3*. В якорях машин постоянного тока распространено крепление бандажами *2* и пазовой части обмоток. Для этого сердечник якоря шихтуют из листов разного диаметра, так что на его наружной поверхности образуется несколько углублений. В этих углублениях размещают витки бандажа.

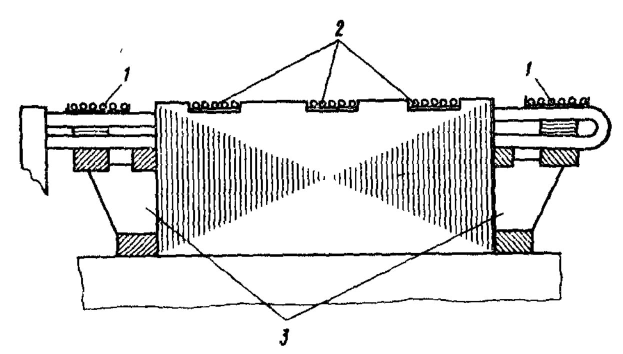


Рис 158. Крепление обмотки якоря бандажами

Для крепления пазовой части обмотки фазных роторов асинхронных двигателей бандажи не применяют, так как при малом воздушном зазоре асинхронных двигателей любое его изменение даже на незначительных участках по длине машины приводит к ухудшению характеристик двигателя.

§ 57. НАМОТКА ПРОВОЛОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ

Проволочные бандажи наматывают из стальной проволоки специальных сортов с высокой механической прочностью, которая называется бандажной. Бандажная проволока поступает на завод луженая, в бухтах. Диаметр проволоки 0,2–2,5 мм. Наиболее часто употребляется проволока диаметром от 0,5 мм для бандажей малых машин до 1,5 мм для машин с диаметром якоря до 1000 мм. Проволока наматывается с определенным натяжением (табл. 9) меньшим, чем предел ее механической прочности. Число витков бандажа рассчитывается отдельно для пазовой и лобовых частей обмотки таким образом, чтобы

Таблица 9. **Натяжение бандажной проволоки при намотке бандажей**

Диаметр якоря, мм	Диаметр проволоки, мм	Натяжение проволоки, Н, при намотке		
		1-го слоя	2-го слоя	3-го слоя
100–200	0,8	350–540	300–490	300–450
201–400	1,0	540–790	490–790	450–690
401–600	1,2	790–1120	740–1130	640–1030
601–1000	1,5	1230–1820	1130–1720	980–1620
Свыше 1000	2,0	2160–3230	2010–3090	1770–2850

усилие, оказываемое всеми витками бандажа на пазовую и лобовые части обмотки, было бы больше, чем центробежная сила, действующая на них во время работы машины. Натяжение проволоки при намотке зависит от ее диаметра и должно быть строго выдержано при намотке всех витков бандажа.

В машинах с большим диаметром якоря и особенно часто в быстроходных машинах необходимое число витков бандажа оказывается больше, чем можно расположить в один слой на лобовых частях якоря. В этих случаях бандажи наматывают в два или три слоя. Первый слой проволоки наматывают с полным натяжением, а каждый последующий с несколько меньшим, как указано в табл. 9, чтобы не деформировать витки нижних слоев.

Для намотки бандажа якорь устанавливают на бандажировочный станок. На лобовые части укладывают подбандажную изоляцию, состоящую обычно из двух слоев стеклолакоткани, закрепленной по всей поверхности стеклянной лентой, намотанной вполнахлеста. Ширина подбандажной изоляции должна быть на 10—12 мм больше, чем ширина бандажа, чтобы его крайние витки не могли соскользнуть на лобовые части. Конец бандажной проволоки закрепляют на якоре. Первые несколько витков бандажа делают на поверхности сердечника якоря, постепенно увеличивая натяжение проволоки до требуемого. После этого, подложив электрокартон, переводят проволоку на подбандажную изоляцию лобовой части. На подбандажной изоляции в нескольких местах по окружности под первым витком проволоки располагают на равном расстоянии друг от друга полоски белой жести длиной, несколько большей, чем ширина бандажа. Эти полоски служат для скрепления витков намотанного бандажа. В начале витка устанавливают дополнительно более длинную полоску жести и загибают ее над проволокой, с тем чтобы второй и последующие витки прижали ее загнутый конец к подбандажной изоляции (рис. 159, *а*). На расстоянии 30—40 мм от нее устанавливают вторую полоску жести для более прочного закрепления первого и последнего витков бандажа. Все витки бандажа наматывают с постоянным строго определенным натягом.

Обмотчик при намотке должен следить, чтобы витки ложились ровно и плотно друг к другу. Для этого ему приходится время от времени останавливать станок и, не снимая натяга проволоки, подбивать отошедшие витки к

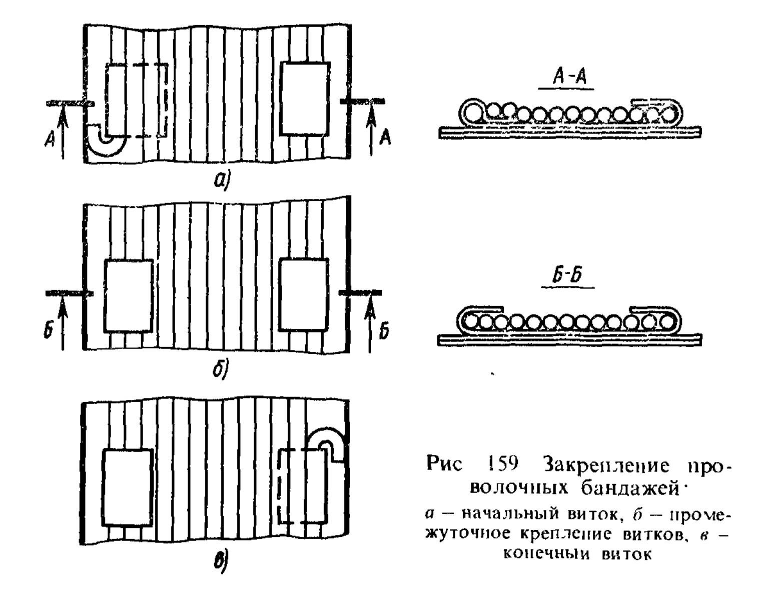


Рис 159 Закрепление проволочных бандажей:

а — начальный виток, *б* — промежуточное крепление витков, *в* — конечный виток

ранее уложенным молотком через деревянную или гетинаксовую подбойку.

Обе лобовые части бандажируют целым куском проволоки, не снимая натяга. После намотки бандажа на одну лобовую часть витки закрепляют жестяными скобочками (рис. 159, *б*) и переходят к наложению бандажа на другую лобовую часть, сделав несколько редких переходных витков на средней части якоря. Последний виток бандажа также закрепляется скобочкой. Места закрепления первых и последних витков бандажей каждой из лобовых частей пропаивают, и только после этого может быть снято натяжение и проволока отрезана от бухты. Концы каждого из бандажей заправляют в подготовленные петли скобочек и отгибают (рис. 159, *в*). После этого всю поверхность бандажей пропаивают припоем ПОС-40. Прогрев бандажа во время пайки должен быть быстрым, чтобы подбандажная изоляция не успела прогреться, иначе чрезмерный нагрев может повредить изоляцию лобовых частей обмотки. Поэтому для паяния бандажей применяют мощные электрические паяльники с широкой торцевой частью. В качестве флюса используют только канифоль.

Проволочные бандажи наматывают на бандажировочных станках; это могут быть либо специализированные станки,

выпускаемые промышленностью, либо станки, переделанные из токарных. В станке обязательно должно быть устройство для натяжения бандажной проволоки, снабженное динамометром, по которому обмотчик имеет возможность во время намотки контролировать натяжение, а также устройство, позволяющее регулировать частоту вращения якоря и останавливать его для поправки уложенных витков проволоки. Натяжение во время остановки якоря должно оставаться прежним. Кроме того, станок должен быть оборудован защитным устройством, предохраняющим обмотчика от ударов случайно разорвавшейся во время намотки проволоки, так как концы разорванной при большом натяжении стальной проволоки могут нанести ему серьезные ранения

§ 58. БАНДАЖИ ИЗ СТЕКЛОЛЕНТЫ

В современных машинах проволочные бандажи наматывают только на больших якорях. На якорях машин малой и средней мощности вместо проволочных наматывают бандажи из нетканой стеклоленты – однонаправленных стеклянных нитей, пропитанной в термореактивных лаках ПЭ-953 для классов нагревостойкости изоляции А, Е и В или в лаке ПЭ-933 для класса нагревостойкости F.

Бандажи наматывают на бандажировочных станках, оборудованных устройством для натяжения стеклоленты, динамометром и тормозным устройством, позволяющим останавливать намотку при сохранении натяжения ленты. Перед намоткой стеклоленты ее конец закрепляют на якоре, прижав его к середине лобовой части 1,5–2 витками бандажа при неполном натяжении ленты. Увеличивают натяжение до 930–980 Н (до 95–100 кгс), под натянутую ленту заправляют край полосы из стеклоткани шириной примерно в 1,5 раза большей, чем ширина бандажа, и обертывают ее один раз вокруг лобовых частей якоря. Витки бандажной ленты накладываются на эту полосу с полным натяжением вполнахлеста от первого витка в сторону головок лобовых частей.

На границе бандажа согласно чертежу обмотки наматывают несколько витков ленты один на другой. При этом образуется буртик, на который завертывают подложенную под бандаж полосу стеклополотна. Таким образом появляется упор, препятствующий сползанию витков ленты в сторону головок лобовых частей. Завернутый край стекло-

полотна прижимается последующими витками, образуя чехол для крайних витков ленты Все остальные витки наматывают рядами вполнахлеста, размещая их между бортиком и торцом якоря. Количество витков указывается в чертеже обмотки. Конец последнего витка должен располагаться на середине по ширине бандажа. Для его закрепления на бандаж перпендикулярно ленте укладывают согнутую петлей тонкую проволоку и прижимают ее последними тремя витками ленты, которые наматывают один на другой, постепенно уменьшая натяжение примерно до половины первоначального. После этого полностью освобождают ленту и перерезают ее. Конец ленты закрепляют, продевая в петлю и протаскивая под последними витками Последний виток пропаивают горячим паяльником. От нагрева лак, которым пропитана бандажная лента, запекается и прочно удерживает конец бандажа. Бандаж на лобовые части со стороны коллектора наматывают, не устанавливая чехла, так как роль бортика играют петушки коллектора.

После намотки бандажей из стеклоленты их запекают Якорь выдерживается в печи при 145—150 С в течение 12 ч. За это время термореактивный лак, которым пропитана бандажная стеклолента, полимеризуется и бандаж превращается в монолитное кольцо, прочно удерживающее лобовые части обмотки во время работы машины.

Бандажи из стеклоленты состоят из большого числа витков, поэтому необходима правильная раскладка ленты вполнахлеста по ширине бандажа. Намотка их на несовершенном оборудовании сопряжена с большими затратами времени.

На заводах применяют специальные станки, предназначенные для намотки бандажей из стеклоленты. Кинематическая схема одного из таких станков приведена на рис. 160. Станок состоит из станины *15*, задней подвижной бабки *11*, передней бабки *5* и подвижной каретки *18*. В передней бабке находится коробка скоростей *3* и системы шестерен *1* и *7*. В каретке расположено натяжное устройство стеклоленты *22* и система *16*, обеспечивающая поступательное движение каретки.

Установленный в центрах передней и задней бабок ротор *9* вращается двигателем *21* через клиноременную передачу *2*, коробку скоростей и шпиндель станка *6* Система шестерен *1* приводит во вращение ходовой *14* и силовой *13* валики. От ходового валика приводится в действие система

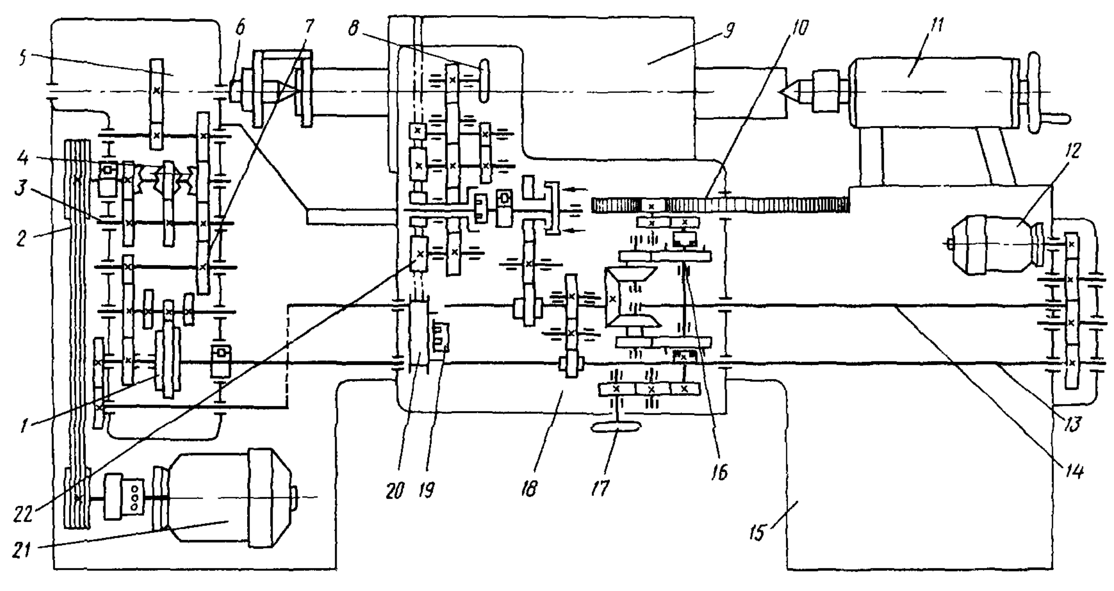


Рис. 160. Кинематическая схема станка для бандажирования стеклолентой

подачи каретки, передвигающейся по зубчатой рейке *10*. Каретка может приводиться в движение также вручную штурвалом *17*. Ускоренное движение каретки осуществляется от привода двигателя *12*, сцепленного с ходовым валиком обгонной муфтой. Силовой валик приводит в действие механизм подачи и натяжения ленты *22*. Во время остановки станка муфта *4* тормозит шпиндель, а электромагнитная муфта *19* – барабан с лентой *20* и натяжение ленты сохраняется. Для заправки ленты и создания натяжения служит штурвал *8*, соединенный системой шестерен с механизмом натяжения. Большой ход каретки вдоль якоря позволяет за одну установку наматывать бандажи на обе лобовые части.

Кинематическая схема работы каретки станка с механизмом натяжения приведена на рис. 161. Лента с барабана *4* через направляющий ролик *7* поступает на барабаны *6* и *10* и через направляющие ролики *1*, *5* и *3* наматывается на лобовые части якоря. Большой угол охвата лентой барабанов не дает ей возможности проскальзывать по их поверхностям. Натяжение ленты создается торможением барабанов. Степень натяжения контролируется динамометром *2*. Для усиления или уменьшения натяжения рукояткой *8* поджимают или отпускают пружину тормоза *9*.

В настоящее время для намотки бандажей из стеклоленты промышленность выпускает бандажировочные станки типа БР. На различных моделях полуавтоматических станков этого типа можно наматывать бандажи из стеклоленты на якоря диаметром от 80 (станок БР-1) до 1200 мм (станок БР-2). Станки обеспечивают высокую производительность и хорошее качество намотанных бандажей. Частота вращения шпинделя этих станков может меняться: 42–200 об/мин при намотке бандажей на якоря машин малой мощности и 10–70 об/мин – при намот-

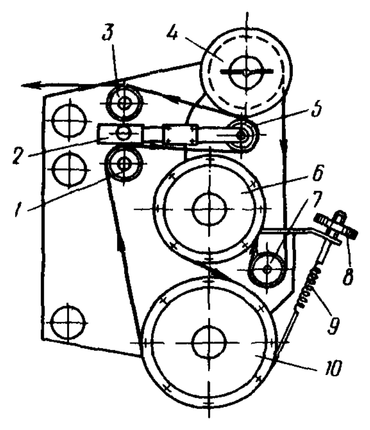


Рис. 161. Кинематическая схема каретки бандажировочного станка с механизмом натяжения

ке бандажей на якоря машин большой мощности. Число витков намотанного бандажа автоматически фиксируется счетчиком.

§ 59. КРЕПЛЕНИЕ ОБМОТКИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Сложность крепления обмоток возрастает с увеличением их массы, диаметра, на котором они располагаются, и частоты вращения якоря или ротора. В наиболее крупных электрических машинах — турбогенераторах, вращающихся с частотой 3000 об/мин, диаметр ротора достигает одного метра В таких машинах для крепления пазовой части обмотки возбуждения, расположенной на роторе, применяют клинья из дюралюминия марки Д16, обладающего большой механической прочностью.

Заклиновку производят с помощью пневматических устройств, имеющих вертикальные прессы для опрессовки обмотки в пазу и горизонтальные толкатели для продвижения клиньев вдоль паза. Первыми устанавливают в пазы средние клинья — на середину ротора. Обмотку на участке размещения первых клиньев опрессовывают вертикальными прессами и укладывают на нее прокладки из стеклотекстолита. Клинья, предварительно охлажденные в ванне с жидким азотом, вставляют в пазы с торца ротора и продвигают на место горизонтальными толкателями. После этого вертикальные прессы сдвигают вдоль ротора на длину одного клина и в том же порядке устанавливают следующие клинья.

Лобовые части обмотки ротора крепят массивными бандажными кольцами, изготовленными из высокопрочной немагнитной стали (рис. 162) Бандажные кольца *2* обычно имеют две посадки: их насаживают на ротор *1* и на центрирующее кольцо *4*, нагревая до 150—230 °С (температура зависит от типа ротора и размеров кольца).

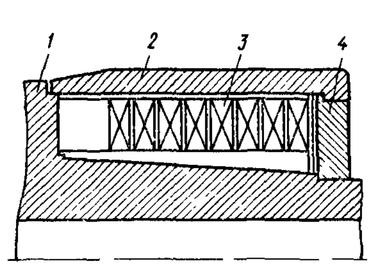


Рис 162 Бандажное кольцо ротора турбогенератора

Бандажные кольца крупных турбогенераторов — наиболее напряженные в механическом отношении детали, так как во время работы машины на них действуют большие центробежные силы от массы лобовых частей *3* обмотки ротора и собственной массы колец.

Изготовлению бандажных колец и их установке на ротор уделяется много внимания. При перекосах бандажных колец во время насадки, ударах или чрезмерных нагрузках могут произойти местные концентрации напряжений в металле кольца, что может вызвать его разрушение во время работы и привести к повреждению генератора.

Наиболее прогрессивным методом насадки бандажных колец является нагрев предварительно насаженного (не до конца) на лобовые части и отцентрированного кольца и последующая насадка на посадочные поверхности с заданным натягом с помощью горизонтального гидравлического пресса, создающего равномерное давление по всему торцу кольца.

§ 60. ОТДЕЛКА ЯКОРЯ

Отделка якоря состоит в закреплении свободной поверхности миканитовых манжет на конусах и проточке, продороживании и полировании рабочей поверхности коллектора.

Заделка миканитовых манжет. После сборки коллектора часть поверхности изоляции переднего и заднего нажимных конусов остается открытой (рис. 163). На нее и на торцы пластин коллектора осаживается графитовая пыль от щеток. Она может также проникнуть в зазор между верхним скосом ласточкина хвоста пластин и изоляцией нажимных конусов Загрязнение этих участков приведет к перекрытию изоляции между пластинами и к замыканию их между собой Чтобы этого не случалось, на свободную поверхность миканитовых манжет накладывают бандаж из шнура или слой ленты изоляционного материала; он должен полностью закрывать всю поверхность миканита и вплотную прилегать к торцам коллекторных пластин Витки ленты

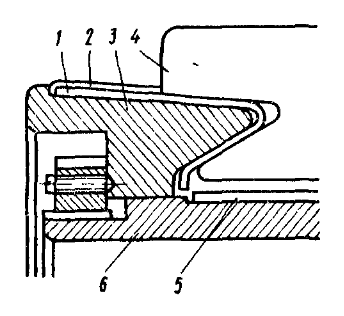


Рис 163 Заделка миканитовых манжет

1 – миканитовая манжета, *2* – бандаж, *3* – передний нажимной конус, *4* - пластина коллектора, *5* – изоляция втулки, *6* – втулка коллектора

закрепляют и покрывают эмалью. Одновременно эмаль наносят на торцевые части коллекторных пластин.

Лента предохраняет изоляцию манжет от выветривания, а гладкая поверхность эмали не дает возможности задерживаться на ней грязи и щеточной пыли. Эти операции выполняют после насадки коллектора на вал до укладки обмотки, так как после укладки поверхность заднего нажимного конуса будет закрыта лобовыми частями обмотки якоря

Проточка коллектора. К состоянию рабочей поверхности коллектора предъявляются высокие требования. Допустимая шероховатость поверхности не должна превышать норм 7 8-го классов. Биение поверхности при работе машины в зависимости от размеров коллектора не должно превышать 0,01 – 0,06 мм. При бо́льших биениях поверхности относительно оси вращения вала щетки во время работы могут отрываться от поверхности пластин и нарушать контакт между обмоткой и коллектором. Это вызывает искрение и быстрый износ коллектора.

Обточку коллекторов машин малой и средней мощности производят на переоборудованных быстроходных токарно-винторезных станках. Для получения требуемой чистоты поверхности скорость резания должна составлять 200 – 250 м/с при очень малой подаче – около 0,05 мм/об и малой глубине резания до 0,05 мм. Для обточки применяют твердосплавные резцы вольфрамокобальтовой группы со специальной геометрией режущей грани.

Чтобы обеспечить соосность поверхности коллектора и шеек вала, якорь во время проточки устанавливают в люнеты на шейки вала или в собственных подшипниках. На рис 164 показана установка якоря *3* для проточки

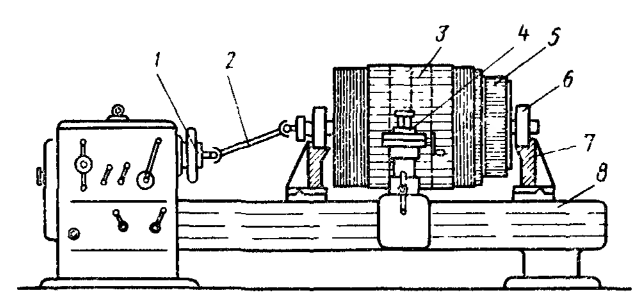


Рис 164 Якорь, установленный для проточки коллектора на токарно-винторезном станке

коллектора 5 в собственных подшипниках 6, закрепленных на раздвижных стойках-люнетах 7. Его приводят во вращение шпинделем 1 станка 8 через шарнирную передачу 2. Такая передача позволяет протачивать на станке коллекторы различных диаметров, причем якорь вращается вокруг оси шеек вала, т. е. таким же образом, как и при установке якоря в машине. Резец для обточки коллектора крепится в суппорте 4 станка. Необходимая частота вращения, величина подачи и глубина резания устанавливаются в зависимости от размеров коллектора.

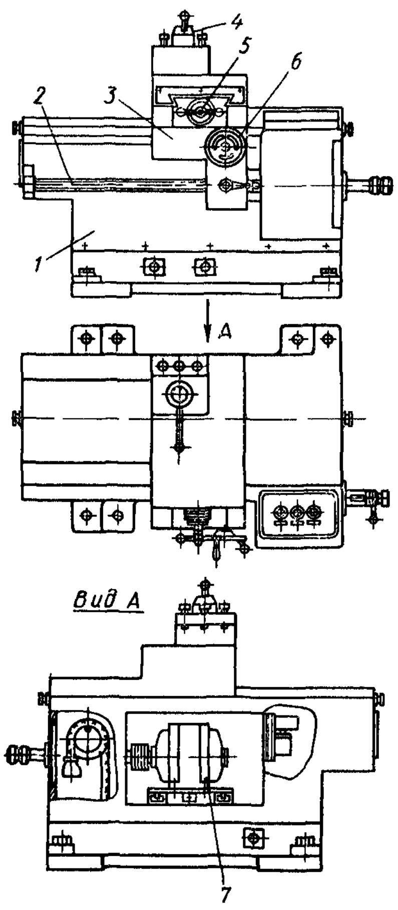


Рис. 165. Переносной суппорт для проточки коллектора

Коллекторы больших машин с диаметром более 1500 мм протачивают в собранной машине. Для этой цели пользуются переносным суппортом (рис. 165), состоящим из станины 1 и каретки 3 с резцедержателем 4. Каретка приводится в движение от электродвигателя 7 через коробку скоростей и ходовой винт 2 или вручную маховиком 6. Поперечная подача резца осуществляется при повороте маховика 5. Якорь приводится во вращение приводным двигателем, соединенным с валом якоря муфтой. В некоторых случаях для вращения якоря используют собственный вращающий момент машины постоянного тока. Для этого на коллекторе оставляют только по одной щетке на каждом щеточном болту и подают на них пониженное напряжение, с тем чтобы скорость на поверхности кол-

лектора составляла около 100–120 м/мин. При таком способе резец следует устанавливать на геометрической нейтрали, т.е. строго между осями двух соседних главных полюсов машины и изолировать его от корпуса переносного суппорта.

Продороживание коллектора. Коллекторные пластины изолируют друг от друга пластинками из коллекторного миканита – твердого изоляционного материала, который может выдержать большое давление на плоскость, но хрупок и легко выкрашивается с поверхности коллектора при трении о нее щеток. При этом отдельные пластинки слюды могут выступать над коллекторными пластинами и создавать помехи движению щеток по поверхности коллектора. Чтобы этого не случилось, коллектор продороживают. Так называется технологическая операция, при которой миканитовую изоляцию между пластинами коллектора удаляют на глубину 1–1,5 мм путем фрезерования канавок (дорожек) между пластинами (рис. 166).

Для фрезерования используют фрезы небольшого диаметра, приводимые во вращение быстроходными электродвигателями. Толщина фрез должна быть на 0,1 мм больше, чем толщина миканитовых прокладок. Диаметр фрез должен быть маленьким, чтобы фреза могла проходить всю рабочую поверхность коллектора, не упираясь в петушки пластин (рис. 167). При обратном движении фреза выходит за край коллектора на 10–15 мм.

Подача суппортов с установленными на них фрезами на различных станках осуществляется либо вручную, либо автоматически в зависимости от типа станка. После фрезерования изоляции между одной парой пластин якорь с коллектором поворачиваются на одно коллекторное деление и фрезеруется изоляция между следующими пластинами. На станке не может быть установлен строго фиксированный угол поворота якоря, так как толщина изоляции между пластинами имеет определенный допуск. При постоянном угле поворота коллектора может создаться такое положение, что разница в толщинах изоляции при переходе фрезы от пластины к пластине постепенно накопится и в конце концов фреза, оставив нетронутой часть миканита, будет прорезать край коллекторной пластины. Поэтому в полуавтоматических станках для продороживания применяют плавающее крепление фрезы и во время работы она получает коррекцию положения в зависимости от боковых стенок пластин коллектора.

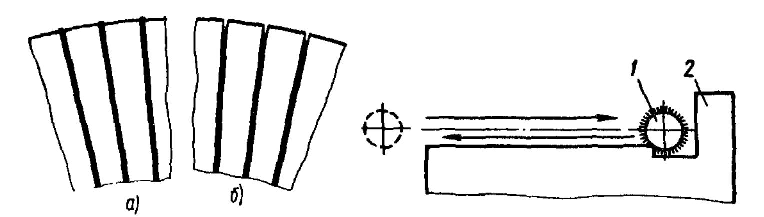


Рис. 166. Изоляция между пластинами коллектора:

а — непродороженного, *б* — продороженного

Рис. 167. Продороживание коллектора фрезой:

1 — фреза, *2* — петушок коллекторной пластины

На рис. 168 изображена кинематическая схема полуавтоматического станка для продороживания коллекторов. Станок состоит из станины *1*, передней неподвижной *7* и задней подвижной *2* бабок, в центрах которых устанавливается якорь *3*. Фреза *4* получает вращение от высокоскоростного двигателя *5*, расположенного на ползуне *6*. Движение ползуна с установленной на нем фрезерной головкой вдоль коллектора осуществляется от электродви-

Рис. 168. Полуавтоматический станок для продороживания коллектора

гателя *9*, через систему шестерен *8*, которые служат для изменения скорости подачи и возвратного движения ползуна после прохода вдоль коллектора. Эта же система шестерен предусматривает поворот якоря на нужный угол после выхода фрезы за торец коллектора. Крепление фрезы в головке плавающее, так что фреза всегда устанавливается на расстоянии одного коллекторного деления от профрезерованной перед этим дорожки. Такая система исключает возможность заметного сдвига фрезы относительно середины изоляции и обеспечивает полное удаление изоляции между коллекторными пластинами на заданную глубину

После фрезерования края коллекторных пластин зачищают шабером и остатки чешуек слюды и заусенцы на краях медных пластин удаляют. Шлифование и полировка поверхности коллектора производятся после проточки на токарном станке и продороживания коллектора. Коллектор шлифуют либо стеклянной шкуркой с зернистостью № 80 – 100 при большой частоте вращения якоря, либо с помощью карборундовых кругов с предварительно обработанной цилиндрической поверхностью. Стеклянная шкурка прижимается к поверхности коллектора деревянными колодками, обработанными по радиусу коллектора. Так же поступают и в процессе эксплуатации машины для периодической очистки и выравнивания рабочей поверхности коллектора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Как закрепляются в пазах статора проводники всыпной обмотки?

2 В каких машинах устанавливают пазовые крышки?

3 Как работают механизмы для заклинивания пазов в станках ЗС?

4 Из чего делают пазовые клинья для закрепления обмотки в пазах?

5 Опишите работу станков для бандажирования лобовых частей обмотки статоров

6 Как крепятся лобовые части катушек из прямоугольных проводов?

7 Из какой проволоки наматывают бандажи на лобовые части якорей?

8 Как закрепляют витки проволочных бандажей?

9 Опишите последовательность намотки бандажей из стеклоленты

10 Опишите работу механизма натяжения стеклоленты во время намотки бандажей

11 Как крепятся лобовые части обмотки роторов мощных турбогенераторов?

12 Какое оборудование нужно для проточки коллектора?

13 Зачем продороживают коллектор?

ГЛАВА XIII
ПРОПИТКА И СУШКА ОБМОТОК

§ 61. ПРОПИТОЧНЫЕ СОСТАВЫ И МЕТОДЫ ПРОПИТКИ

Пропитка обмоток электрических машин повышает их надежность. Пропиточные лаки, проникая между проводниками катушек и заполняя воздушные промежутки между слоями изоляции, делают обмотку монолитной; повышаются механическая и электрическая прочность изоляции и ее теплопроводность. Пленка, образующаяся на поверхности пропитанной обмотки, препятствует проникновению в нее влаги, паров масел и других веществ из окружающего воздуха, оказывающих вредное действие на электроизоляционные материалы. Перед пропиткой обмотку обязательно сушат, чтобы удалить из ее изоляции влагу и обеспечить более полное заполнение пропиточным составом всех пустот в обмотке и пор изоляции.

Для пропитки применяются лаки с растворителями, лаки без растворителей и компаунды.

Лаки с растворителями состоят из основы лака (50–55 % объема) – натуральных или синтетических смол и растворителей – легко испаряющихся веществ (ксилола, толуола и др.), служащих для разжижения основы лака. В состав лака добавляется также некоторое количество пластификаторов, придающих гибкость застывшей лаковой пленке, и сиккативов – веществ, ускоряющих процесс отвердевания основы лака после пропитки. При добавлении растворителей пропиточный состав разжижается и во время пропитки основа лака проникает внутрь обмотки и остается там после испарения растворителей. Однако объем, занятый растворителем после его испарения, остается свободным и его снова заполняет воздух. Поэтому пропитку производят не один, а два или три раза с обязательной промежуточной сушкой. Этим достигается более полное заполнение всех пустот основой лака.

Для пропитки обмоток с изоляцией классов нагревостойкости E и B наибольшее распространение получили лаки с растворителями МЛ-92 и МГМ-8, основой которых служит натуральная глифталевая смола; с изоляцией класса нагревостойкости F – лаки ПЭ-933 и ПЭ-993, основа которых состоит из синтетических полимерных веществ и смол; с изоляцией класса нагревостойкости H – лаки К-47

и К-47к, имеющие высокую нагревостойкость, пригодные для пропитки обмоток влагостойкого тропического и химостойкого исполнений.

Пропитка в лаках с растворителями производится путем погружения в лак или заполнения пропиточным составом лаковой ванны с установленными в ней изделиями. Оборудование для пропитки занимает много места, а процесс пропитки сопровождается выделением большого количества летучих – паров растворителей. Поэтому для пропитки выделяют отдельные участки цехов и оборудуют их мощной системой вентиляции.

Лаки без растворителей полностью, на 100 %, состоят из основы лака, поэтому более полное заполнение обмотки достигается быстрее, чем при применении лаков с растворителями. Широкое распространение в современном электромашиностроении получили лаки без растворителей КП, состоящие из полиэфирных смол с добавкой кремнийорганической смолы (лак КП-34) или эпоксидной смолы (лак КП-103). Лаки этого типа становятся жидкотекучими и легко проникают внутрь обмотки при нагреве их до 70–80 °С, а при 150–160 С быстро отверждаются под действием инициатора – перекиси бензоила, вводимого в состав лака до пропитки.

Оборудование для пропитки лаками без растворителей занимает относительно мало места. Это позволяет встраивать его непосредственно в технологические линии изготовления электрических машин. Сравнительно небольшое количество паров лака, выделяющихся во время пропитки удаляется вентиляторами, смонтированными в пропиточных установках.

Компаундами называют пропиточные составы, жидкие в нагретом состоянии в момент их применения и твердеющие после охлаждения или в результате происходящих в них химических реакций. Компаунды, твердеющие при охлаждении, называют термопластичными. При повторном нагреве они снова размягчаются и опять твердеют при охлаждении. К таким компаундам относятся битумные, которые еще недавно применялись для пропитки всех высоковольтных обмоток с непрерывной изоляцией и обмоток машин низкого напряжения с усиленной влагостойкой изоляцией. Температура размягчения битумных компаундов не превышает 125–130 °С, поэтому в них пропитывают лишь изоляцию обмоток с классом нагревостойкости В, находящихся на неподвижных частях машины, т. е. изоляцию

обмоток статоров в машинах переменного тока или катушек возбуждения в машинах постоянного тока.

В настоящее время более распространены компаунды, затвердевающие в результате химических процессов, происходящих в них после пропитки изоляции обмоток во время запечки при высокой температуре. Такие компаунды называют термореактивными, так как после затвердевания они не могут быть снова размягчены. К термореактивным относятся компаунды на основе эпоксидной смолы. Они служат для пропитки изоляции машин высокого напряжения типа «монолит», состоящей из нескольких слоев слюдинитовой или слюдопластовой ленты, намотанных вполнахлеста, или гильзовой изоляции из тех же изоляционных материалов. Для затвердевания изоляции в состав компаунда вводят отвердитель. После запечки термореактивный компаунд образует прочный монолитный слой, имеющий хорошие влагостойкость, электрическую и механическую прочность. По нагревостойкости такая изоляция относится к классу F

§ 62. СУШКА

Сушка перед пропиткой. Обмотка перед пропиткой подвергается предварительной сушке, так как изоляционные материалы в своих порах и капиллярах содержат некоторое количество влаги, которая снижает электрическую прочность изоляции и препятствует проникновению в нее пропиточного состава. Длительность и температура сушки зависят от класса нагревостойкости и конструкции изоляции обмотки, степени ее увлажнения и методов сушки. В среднем температура сушки для изоляции класса E составляет 120—140 °С, класса нагревостойкости B — 120—150 °С и класса F — 120—180 С. Длительность сушки меняется в пределах 1—6 ч в зависимости от типа обмоток.

Для более полного удаления влаги из обмотки применяют вакуумную сушку, т.е. сушку в камерах, позволяющих чередовать атмосферное давление и разрежение. Обмотка первоначально нагревается до заданной температуры при атмосферном давлении, после чего в камере создается пониженное давление, равное 13—67 кПа (10—50 мм рт. ст.), при котором происходит интенсивное удаление влаги из изоляции. Вакуумирование позволяет, кроме того, уменьшить температуру сушки по сравнению с сушкой при нормальном давлении на 20—30 С, что ослабляет процесс старения изоляции во время нагрева.

Сушка после пропитки. После пропитки в лаках, содержащих растворители, сушка необходима для удаления растворителя из слоев изоляции и для затвердевания основы лака. Процесс сушки разделяют на два периода. В первом происходит разогрев обмоток при одновременном удалении растворителей. Температура в этом периоде не должна превышать 100 – 120 °С, так как при более высоком нагреве может произойти частичное запекание пленок лака до полного удаления растворителя, что затруднит дальнейшую сушку обмотки. Длительность сушки при этой температуре составляет 2 – 4 ч. Во втором периоде сушки после испарения растворителя происходит запечка основы лака внутри изоляции. Температуру в сушильной камере повышают до 130 – 145 С для изоляции класса нагревостойкости B, до 150 – 160 С для класса F и 180 – 200 С для запекания лаков на кремнийорганической основе (К-47к), относящихся к изоляции класса H. Длительность сушки при этой температуре составляет в среднем 6 – 16 ч и зависит от марки лака и конструкции изоляции.

Первый период сушки на некоторых заводах проводят в вакуумной камере при пониженном давлении. При этом температуру снижают до 70 – 80 С, что уменьшает вредное действие паров растворителей на изоляцию.

После пропитки в лаке без растворителей изоляцию сушат, ускоряя загустевание лака, что предотвращает его вытекание из изоляции. Обмотку, пропитанную в компаундах, сушке не подвергают. Отдельные катушки или статоры и якоря с уложенными в них обмотками сушат в печах или методами индукционного нагрева, терморадиационным, токовым.

Наиболее распространена сушка в печах (конвективный метод), несмотря на то, что она требует наиболее длительного времени. При наружном обогреве в первую очередь подсыхает верхний слой изоляции. На нем образуется пленка лака, затрудняющая испарение растворителя из внутренних слоев изоляции. Преимущество этого метода заключается в возможности одновременной сушки большого числа катушек или статоров с уложенной обмоткой, которые загружают в одну сушильную камеру, в удобстве контроля за температурой сушки и устройства программного управления режимом сушки

Индукционный метод применяют главным образом для сушки изоляции обмотки небольших машин. Сердечник с уложенной в пазы обмоткой помещают в индуктор, имею-

щий сходную с ним конфигурацию и размеры. Индукторы в зависимости от конструкции питаются током высокой или промышленной частоты и наводят вихревые токи в стали сердечника, нагревая его.

Терморадиационный метод сушки состоит в нагреве пропитанных деталей в инфракрасных лучах. Для сушки применяют специальные лампы накаливания с зеркальными отражателями, трубчатые электронагреватели или металлические плиты, которые при нагреве до 300–450 °С излучают инфракрасные лучи.

Токовый метод сушки основан на нагревании изолированных катушек или уложенных обмоток при пропускании по ним тока. Неудобство этого метода заключается в необходимости надежного электрического соединения выводных концов катушек или обмотки с зажимами источника тока и задания правильного значения тока для обеспечения режима сушки. При большом токе внутренние слои изоляции, прилегающие к проводникам, перегреваются, что вызывает усиленное старение изоляции. Слишком маленький ток требует увеличения времени сушки.

При мелкосерийном производстве электрических машин для сушки в основном используют конвективный метод. Сушку производят в так называемых тупиковых сушильных печах.

Сушильная печь (рис 169) представляет собой камеру *8* с железным полом, в которую подается тележка *9* с установленными на нее катушками или сердечниками с обмоткой. Стенки камеры выложены огнеупорным кирпичом и шлаковатой. Дверцы камеры *7* стальные, обычно подъемные с противовесом *4*, что позволяет без труда открывать их. В потолке камеры установлен калорифер *5* с трубчатыми электронагревателями. Над калорифером находится вентилятор *2*, приводимый в движение электродвигателем *3* Воздух от вентилятора, нагреваясь в калорифере, проходит в отверстие *6* в потолке камеры и обдувает установленные для сушки изделия. После этого через отверстие *10* у пола сушильной камеры по воздуховоду *1* воздух возвращается к вентилятору. Температура в камере регулируется автоматически по данным установленных в камере термодатчиков. В зависимости от их показаний отключаются или включаются секции калорифера. Насыщенный парами растворителя воздух может отводиться от печи; в этом случае вентилятор засасывает чистый воздух из цеха. Количество отводимого воздуха регулируется положением заслонок в воздуховоде.

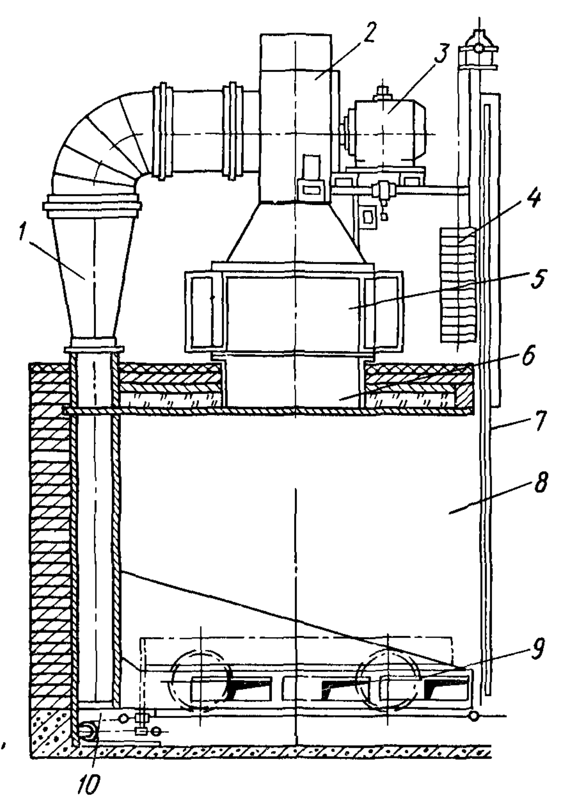


Рис. 169. Тупиковая сушильная печь

В первый период сушки, когда испарение растворителей наиболее сильно, заслонки открыты и от печи отводится практически весь насыщенный парами растворителя воздух. Во время дальнейшей сушки заслонки прикрывают, нагретый воздух циркулирует по замкнутому циклу и температура внутри печи повышается. Время выдержки в печи и температурный режим указываются в технологической документации на каждое изделие и определяются размерами деталей, конструкцией их изоляции и маркой растворителя. Чем выше температура сушки, тем интенсивнее происходит испарение растворителя, быстрее загустевает лак и время сушки сокращается. Но чрезмерное увеличение температуры вызывает усиленное старение изоляции. Поэтому температура и продолжительность сушки строго регламентированы для каждого изделия.

§ 63. ПРОПИТКА ЛАКАМИ С РАСТВОРИТЕЛЯМИ

Основным методом пропитки лаками с растворителями является пропитка погружением в лак. В зависимости от технологии изготовления обмоток пропитывают либо отдельные катушки, либо всю обмотку, уложенную в пазы. В последнем случае в ванну с лаком погружают весь обмотанный статор или ротор. Оборудование пропиточных участков и степень его механизации определяются габаритами и массой пропитываемых изделий и типом производства.

На заводах с крупносерийным производством устанавливают пропиточно-сушильные конвейеры, в которых процессы пропитки и сушки обмоток полностью механизированы. При мелкосерийном производстве пропитку производят погружением отдельных изделий в ванну с лаком, а сушку — в тупиковых печах. Сверху ванны (рис. 170) установлен шкаф *1*, сваренный из угловой стали и обшитый стальным листом. Через дверцу шкафа на поддон *3* загружают катушки. Подъемный механизм *2* опускает загруженный поддон в ванну с лаком *4*. После выдержки в течение заданного времени в лаке (15—30 мин в зависимости от габаритов изделий и конструкции изоляции) поддон с катушками поднимают из ванны. После того как излишки лака стекут в ванну, катушки выгружают и передают на сушку. Шкаф оборудован вытяжной вентиляцией, препятствующей проникновению паров растворителя в помещение цеха.

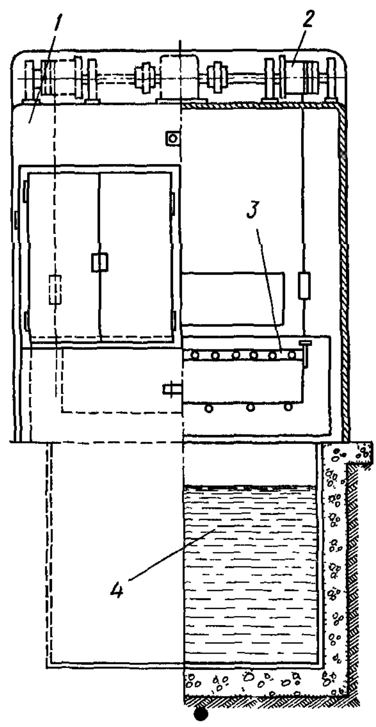


Рис. 170. Ванна для пропитки катушек

Чтобы избежать длительного контакта с окружающей средой большой открытой поверхности лака в ванне во время загрузки и выгрузки изделий, используют так называемый метод нижней подачи лака. В пропиточных устройствах такого типа (рис. 171) лак до пропитки находится в закрытом резервуаре *14*. Предназначенные для пропитки статоры и роторы устанавливают на пропиточных стендах *7* и *11*, после чего в стенды подается лак из резервуара по лаководам *13*. Для этого в резервуаре над лаком повышают давление воздуха, открывая кран *2*, соединяющий резервуар с заводской магистралью сжатого воздуха *5* Когда давление достигнет 400—500 кПа (4—5 атм), открывают краны *9*, вращая стержни *8*, и лак поступает из резервуара в пропиточные стенды. После их заполнения краны *9* закрывают. По прошествии времени, необходимого для пропитки, кран *2* устанавливают на выпуск воздуха из резервуара и вновь открывают краны *9*. Лак перетекает в резервуар. Сжатый воздух из магистрали перед входом в резервуар очищается в фильтре *4* и отстойнике *3*. По мере расхода лака резервуар пополняется из лакохранилища по лакопроводу *15* с помощью насоса *1*. Остатки грязного лака из пропиточных стендов выпускают через кран *10*. Летучие, выделяющиеся во время пропитки, удаляются вытяжной вентиляцией *6*. Крышки стендов для загрузки и выгрузки изделий открываются с помощью пневматического привода, включаемого краном *12*.

Более полное заполнение изоляции основой лака достигается пропиткой обмотки в автоклавах при повышенном (200—300 кПа) давлении после сушки в разреженной атмосфере.

На заводах с крупносерийным производством электрических машин для пропитки лаками с растворителями и сушки обмоток устанавливают сушильно-пропиточные агрегаты, в которых участки сушки и пропитки объединены общей транспортной системой — цепным конвейером. Обмотанные статоры или роторы закрепляются на подвесках цепного конвейера и последовательно проходят различные участки агрегата — сушильные камеры и пропиточные ванны, расположенные на одном или в целях экономии производственной площади на нескольких ярусах. Рядом с сушильной камерой в углублении пола располагается пропиточная ванна. Над ванной трасса конвейера понижается (рис. 172), и закрепленные на подвесках изделия полностью погружаются в лак. После участка пропитки кон-

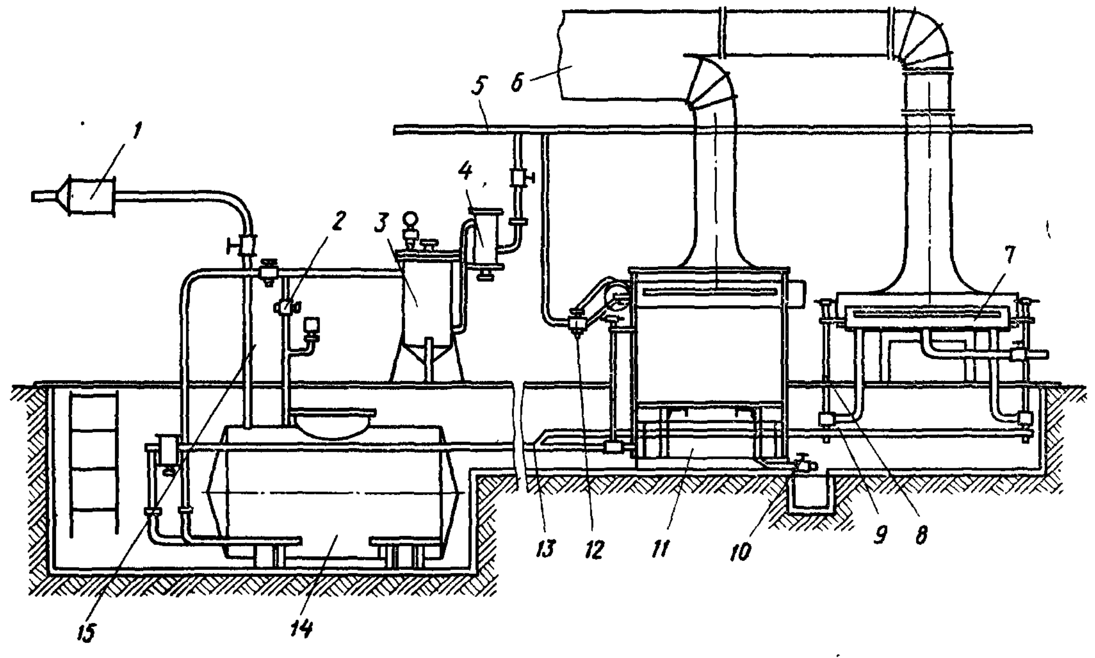


Рис. 171. Установка для пропитки с нижней подачей лака

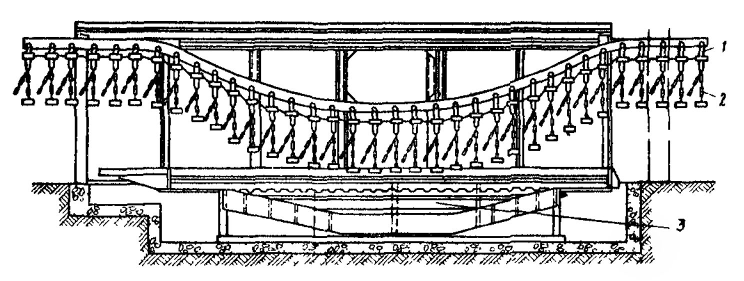


Рис 172 Пропиточная ванна конвейерного сушильно-пропиточного агрегата:

1 – цепной конвейер, *2* – подвески для закрепления статоров, *3* – пропиточная ванна

вейер вновь поднимается и проходит над наклонным лотком, по которому стекают излишки лака с вынутых из пропиточной ванны изделий Далее конвейер перемещает изделия в сушильную печь, которая разделяется перегородкой на две зоны: в первой зоне температура меньше – здесь происходит удаление растворителей, во второй зоне с большей температурой запекается основа лака. По выходе из нее изделия перемещаются к месту разгрузки. При двукратной пропитке изделия после первого цикла не снимаются с конвейера, а после сушки вновь поступают в пропиточную ванну и опять в сушильную печь.

Агрегат оборудован вытяжной вентиляцией, исключающей попадание летучих в помещение цеха. Калориферы, установленные в сушильных печах, обеспечивают равномерный нагрев всего их объема до заданной температуры. Скорость движения конвейера и длина его трассы в каждом из участков агрегата рассчитаны таким образом, чтобы в каждом из них – пропиточной ванне, первой и второй зонах сушильной печи – изделия находились определенное режимом пропитки и сушки время

Для вакуумной сушки и пропитки под давлением в пропиточно-сушильные агрегаты встраиваются автоклавы. Предварительно нагретые в камере до 60–70 С изделия по конвейеру поступают в автоклав, который после этого автоматически закрывается. В нем производится предварительная сушка при низком давлении (2,7–3 кПа). Для пропитки изделий автоклав заполняют лаком и повышают давление до 300–400 кПа. После слива лака изделия

проходят первый этап сушки при давлении 5,4–13,4 кПа. Далее автоклав раскрывается и изделия поступают в проходную сушильную печь для запечки основы лака. Движение конвейеров в таких установках прерывистое, рассчитанное на длительное пребывание изделий в автоклаве.

§ 64. ПРОПИТКА ЛАКАМИ БЕЗ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

Во время пропитки обмоток лаками без растворителей выделение летучих невелико, оборудование для пропитки занимает мало места и его устанавливают непосредственно в обмоточных цехах, встраивая в технологическую линию изготовления статоров или роторов. Это оборудование узкоспециализированное, т. е. рассчитанное для пропитки статоров или роторов машин определенного типа и мощности.

Пропитку статоров асинхронных двигателей со всыпной обмоткой производят на установках УПС, которые работают следующим образом. Пропитываемый статор устанавливают в наклонное положение и нагревают до 80–100 °С током либо подключением обмотки статора к сети, либо с помощью индукторов, смонтированных на приспособлениях для установки статоров. Статор вращают с частотой 20–30 об/мин, а на наружную и внутреннюю поверхности лобовых частей обмотки, находящихся вверху, через сопло подают тонкой струей пропиточный лак. Лак, попадая на нагретый статор, разжижается и проникает внутрь пазов между проводниками. Во время подачи лака нагрев обмотки продолжается, но температура ее не превышает определенного уровня, так как тепловая энергия расходуется на нагревание лака. После прекращения подачи лака статор поворачивается в горизонтальное положение. Вращение и нагрев статора продолжаются Лак равномерно распределяется в лобовых частях, а из-за прекращения подачи холодного лака температура обмотки повышается. Лак постепенно загустевает и в конце пропитки полностью затвердевает, цементируя проводники обмотки и изоляцию.

Установка УПС-3 для пропитки статоров асинхронных двигателей (рис. 173) состоит из вращающегося стола *5* с приспособлениями *8* для закрепления пропитываемых статоров *9*. На столе одновременно закрепляются 12 статоров. Для их установки и съема применяют консольный кран *4*.

Статоры нагревают током, подключая обмотку к сети.

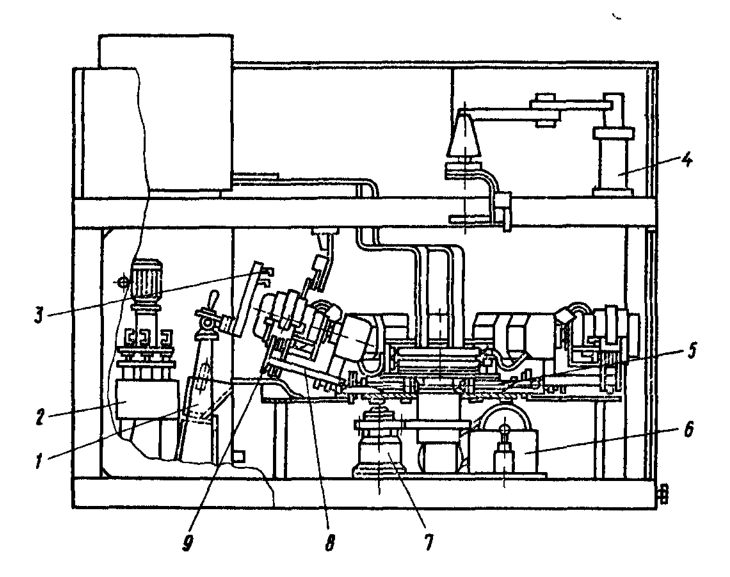


Рис. 173. Установка для пропитки статора УПС-3

Лак подается через сопла *3* через распределитель *1* от дозаторов подачи лака *2*. Под поворотным столом расположены привод вращения статоров *7* и механизм *6*, который поворачивает стол через определенные промежутки времени на $^1/_{12}$ часть окружности. Таким образом каждый установленный для пропитки статор проходит 12 позиций, за время которых происходит полный цикл пропитки.

Производительность всей установки 11 статоров/ч. Пропитка обмотки статоров машин небольшой мощности производится на аналогичных установках – УПС-4, УПС-6.

Статоры, обмотка которых не может быть равномерно нагрета током, например многоскоростных машин с двумя обмотками, нагревают индукционным способом. В установках УПС-2 и УПС-5 на приспособлениях для закрепления статоров установлены индукторы (рис. 174), в каждый из которых вкладывается статор *1*. В обмотку индуктора *3* включают ток. Переменный поток индуктора *2*, проходя по магнитопроводам статора и индуктора, нагревает их и обмотку. В течение всего процесса пропитки и сушки статоров, который происходит так же, как и в описанных ранее установках, статоры находятся в индукторах. Перемещение статоров от одной позиции к другой происходит

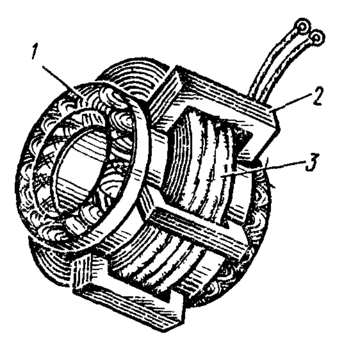


Рис. 174. Индуктор для нагрева стали статора

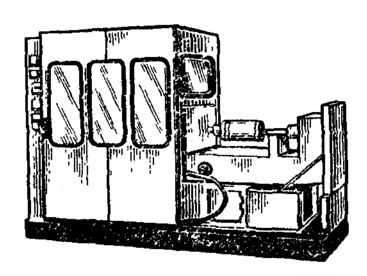


Рис. 175. Установка для пропитки якорей УПЯ-1

не на поворотном столе (как в установке УПС-3), а линейно. С помощью индукторов нагревают также якоря машин постоянного тока при их пропитке на аналогичных установках (УПЯ-1, УПЯ-2, УПЯ-3). Общий вид одной из таких установок показан на рис. 175.

§ 65. ПРОПИТКА КОМПАУНДАМИ

Битумными компаундами пропитывается изоляция отдельных катушек обмоток статоров высоковольтных машин, машин с влагостойким исполнением и катушек возбуждения машин постоянного тока. Схема установки для компаундирования показана на рис. 176. Она состоит из автоклава *15*, смесителя *1*, резервуара для сжатого воздуха (ресивера) *10*, вакуум-насоса *13* и нагнетательного насоса (компрессора) *11*. Автоклав и смеситель, в которых находится компаундная масса, представляют собой резервуары с двойными стенками, между которыми циркулирует горячее масло или пар, разогревающее компаундную массу. В смесителе подготовляется компаундная масса. В автоклаве производят компаундирование.

Катушки, предназначенные для пропитки изоляции, загружают в автоклав, располагая их на выемных стояках таким образом, чтобы они не соприкасались между собой или со стенками автоклава. Загруженные катушки сначала сушат в автоклаве в течение нескольких часов при атмосферном давлении, после чего закрывают крышку *3* и с помощью вакуум-насоса создают в автоклаве разрежение (остаточное давление около 21 кПа). Давление контролируется вакуум-

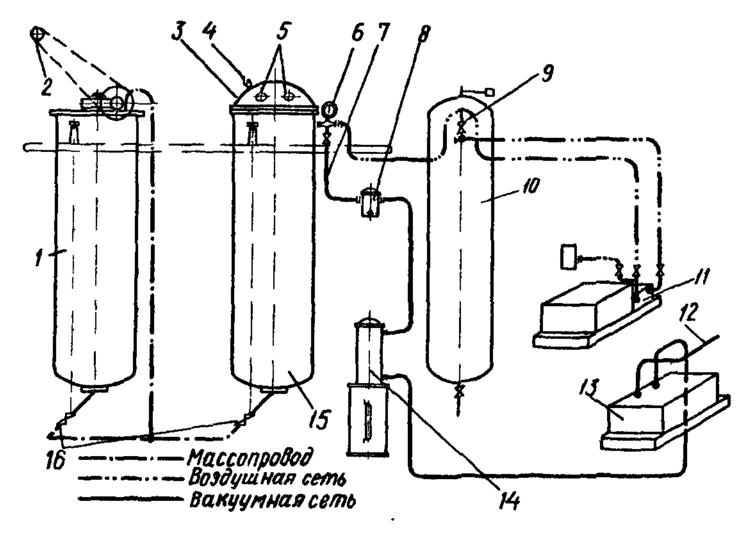


Рис. 176. Установка для компаундирования

манометром *6*. Откачиваемый из автоклава воздух проходит по воздуховоду *7* через очиститель *8* и конденсатор *14*, очищается от загрязнений и выбрасывается вакуум-насосом в окружающую среду через воздуховод *12*. Сушку катушек продолжают при разреженной атмосфере, что способствует лучшему удалению влаги из изоляции.

В смесителе приготовляют компаундную массу, разогревая ее до 160 °С и перемешивая лопастями мешалки, приводимой в движение от электродвигателя *2*. Открыв краны *16*, из смесителя подают компаундную массу в автоклав, заполняя его выше уровня находящихся там катушек. Уровень массы контролируется через смотровые стекла *5* в крышке автоклава. После заполнения автоклава открывают кран *4* и определенное время выдерживают катушки в компаундной массе при атмосферном давлении. После этого кран закрывают и в автоклаве создают разрежение (остаточное давление должно быть не более 2–2,7 кПа). Вакуум поддерживается в течение 15 мин, после чего с помощью нагнетательного насоса в автоклаве давление повышают до 600–700 кПа. Потом опять создают разрежение и снова повышают давление. Такое чередование вакуум – давление повторяют несколько раз. При разрежении из объема изоляции выходят оставшиеся там вкрапления

воздуха. При резком повышении давления происходит гидравлическая опрессовка изоляции и пропитка ее компаундной массой. Чтобы давление поднялось резко, используют ресивер *10*, в который предварительно нагнетается воздух под большим давлением с помощью компрессора. Для опрессовки изоляции обмотки давление в автоклаве поднимают скачком; для этого открывают перепускной кран *9*, соединяющий ресивер с автоклавом. Если для повышения давления в автоклаве использовать только компрессор, то давление в нем будет подниматься медленно и опрессовки изоляции не произойдет.

После окончания компаундирования давление снимают, крышку автоклава поднимают и пропитанные катушки вынимают. Непосредственно после выемки до их остывания с катушек сматывают защитный слой киперной ленты вместе с натеками компаунда и очищают выводные концы. Режим компаундирования: температура массы, избыточное давление и давление при разрежении, время выдержки при каждом из давлений и количество чередований вакуум — повышенное давление разрабатывается для каждого вида катушек в зависимости от их размеров и конструкции изоляции.

Вакуумно-нагнетательный способ применяют также для пропитки и сушки изоляции типа монолит. Существует несколько способов изготовления изоляции монолит. По одному из них катушки или стержни изолируются заданным количеством слоев слюдинитовой ленты вполнахлеста, предварительно пропитанной в термореактивном лаке повышенной вязкости. После наложения изоляции изделия сушат при 70 С и атмосферном давлении в течение 30 мин, а затем при пониженном давлении 2,5—2,7 кПа в течение 4 ч. После этого изоляция запекается в течение 2 ч в горячих прессах при 150—160 С.

При другом способе стержни или катушки изолируют слюдинитовой лентой, содержащей малое количество термореактивного лака без растворителя. После этого производят пропитку в термореактивном лаке при 150—160 °С и малом давлении. Смола проникает внутрь на всю толщину изоляции.

Пропитка многовитковых катушек возбуждения в эпоксидных компаундах производится в автоклавах при последовательных сменах режимов: сушки при атмосферном давлении, вакуумной сушки и пропитки при повышенном давлении. Некоторые усложнения в конструкции пропиточных установок по сравнению с установками для про-

питки битумными компаундами вызваны свойствами эпоксидных компаундов. Сушку и пропитку осуществляют не непосредственно в автоклавах, а в выемном пропиточном баке, который устанавливается в автоклав. Пропиточный бак для очистки от остатков компаунда вынимают из автоклава. Помимо смесителя с компаундной массой в установке имеется также резервуар с отвердителем. Компаундная масса и отвердитель разогреваются в разных резервуарах приблизительно до 50—55 °С, после чего отвердитель подается в смеситель, перемешивается в нем и разогревается до 60 °С и лишь после этого приготовленная масса подается в автоклав для пропитки. В автоклаве во время пропитки поддерживается давление 500—600 кПа. После этого давление снижается до 50 кПа; для этого открывают перепускной кран между смесителем и автоклавом и оставшаяся масса перегоняется в смеситель. Пропитанные катушки вынимают из бака и запекают в печи при 140—150 °С.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие лаки применяют для пропитки обмотки с классами нагревостойкости B и F?
2. Чем отличаются компаунды от лаков?
3. Какие компаунды называют термопластичными и какие — термореактивными?
4. Зачем нужна сушка изоляции перед пропиткой или перед компаундированием?
5. Опишите схему установки и метод пропитки с нижней подачей лака.
6. В чем заключается метод пропитки струйным поливом?
7. Опишите работу пропиточно-сушильного агрегата для пропитки лаками с растворителями.
8. Какие методы сушки обмоток вы знаете?
9. Опишите работу установки для пропитки статоров УПС-3

ГЛАВА XIV

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ОБМОТОК

§ 66. ВИДЫ КОНТРОЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

ГОСТ 183—74 разделяет контрольные испытания электрических машин на приемочные, типовые, приемо-сдаточные и периодические. *Приемо-сдаточные испытания* должна проходить каждая выпускаемая заводом электрическая машина. В их программу для машин всех типов входит измерение сопротивления обмоток и сопротивления их изоляции, испытание электрической прочности изоляции, а также испытания

в режиме холостого хода. Кроме этого синхронные и асинхронные машины испытывают при коротком замыкании, а машины постоянного тока и сихронные – при повышенной частоте вращения.

В машинах постоянного тока должна быть также проведена проверка коммутации при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке по току и проверка номинальных данных. В синхронных машинах с водородным охлаждением проверяют состояние уплотнений и определяют утечку водорода.

Программа *приемочных испытаний* значительно более обширна. Они проводятся на головных образцах электрических машин. Головными образцами называют первые машины, выпущенные заводом после окончательной отработки конструкции и технологии. Остальные машины должны быть выполнены заводом точно такими же, как головные образцы. Поэтому эти машины подвергаются наиболее разносторонним испытаниям, включающим помимо всех испытаний, входящих в программу приемо-сдаточных, также ряд специальных, программа которых для разных типов машин установлена ГОСТами.

Типовые испытания проводят в тех случаях, когда в ранее выпускавшихся машинах произведено какое-либо изменение в конструкции, материалах или в технологии, которое может повлиять на характеристики и выходные данные машины (вибрацию, шум, кпд, коэффициент мощности и т. д.). Программа типовых испытаний составляется для каждого конкретного случая путем дополнения программы приемо-сдаточных испытаний теми или иными пунктами программы приемочных испытаний, установленных ГОСТами, в зависимости от возможных изменений.

Программы и сроки проведения *периодических испытаний* устанавливаются в стандартах или технических условиях на отдельные виды машин. Например, в ГОСТ 19523–74 на асинхронные короткозамкнутые двигатели серии 4А мощностью 0,06–400 кВт установлено, что периодические испытания двигателей проводят не реже одного раза в год по программе приемочных испытаний.

§ 67. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ОБМОТОК

Электрические машины выходят из строя в большинстве случаев из-за повреждения обмоток. Поэтому контролю качества при изготовлении и укладке обмоток уделяется

большое внимание. Операции по контролю качества изготовленной обмотки разделяются на контрольные и испытательные. К контрольным испытаниям относится проверка размеров намотанных катушек, правильности соединения схемы, маркировки выводных концов, отсутствия замыкания между пластинами коллектора, качества пайки различных соединений, измерения сопротивлений обмотки и изоляции и ряд других.

Для выполнения некоторых контрольных операций, например проверки правильности положения бандажей, отгиба лобовых частей, достаточно тщательного осмотра. Правильность размеров определяют шаблонами или макетами. Для измерения применяют различные электроизмерительные приборы. Качество пайки определяют как тщательным осмотром места соединений, так и с помощью измерительных приборов.

§ 68. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Измерение сопротивления обмоток машин постоянного и переменного тока проводят на постоянном токе, т. е. измеряют только активные сопротивления, зависящие от материала, площади поперечного сечения и длины проводников. Для измерений применяют измерительные мосты, электронные приборы – омметры или используют метод амперметра и вольтметра.

Измерительные мосты представляют собой смонтированные в одном корпусе магазины калиброванных сопротивлений, источник питания – батарею на несколько вольт и стрелочный гальванометр. Выводные концы катушки или обмотки, сопротивление которой надо измерить, подключают к зажимам измерительного моста и поворотом ручек переключателей сопротивлений подбирают сопротивление моста, равное измеряемому. Если это сопротивление отличается от сопротивления обмотки, то стрелка гальванометра при нажатии контрольной кнопки отклонится. По резкости и направлению отклонения стрелки судят о необходимости увеличить или уменьшить сопротивление моста и после необходимого переключения снова нажимают контрольную кнопку. Если стрелка неподвижна, то сопротивление моста равно измеряемому сопротивлению.

При работе с измерительным мостом следует быть осторожным, так как при большой разнице измеряемого сопротивления и сопротивления, подобранного в магазине моста,

стрелка очень резко отклонится от среднего положения и, ударившись в ограничитель, погнется. Чтобы этого не случилось, на приборе размещают две контрольные кнопки. Около одной из них написано «Грубо», около другой – «Точно». При нажатии кнопки «Грубо» ток через гальванометр ограничивается и стрелка, несмотря на большую разницу сопротивлений, отклоняется незначительно. Кнопку «Точно» можно нажимать только после того, как сопротивление моста подобрано настолько точно, что при нажатии кнопки «Грубо» стрелка почти не движется. После этого нажимают кнопку «Точно» и, изменяя положения ручек самых малых сопротивлений, окончательно выравнивают сопротивление моста и сопротивление катушки.

Измерения с помощью моста требуют длительного времени, так как при каждом измерении приходится несколько раз переставлять ручки переключателей и нажимать кнопки гальванометра. Значительно удобнее измерять сопротивление с помощью омметров, которые сразу показывают измеряемое сопротивление. Особенно удобны цифровые приборы, в которых значение измеряемого сопротивления высвечивается на шкале.

Для измерения малых сопротивлений используют специальные омметры или метод вольтметра – амперметра. Через измеряемую обмотку или катушку пропускают постоянный ток и измеряют падение напряжения в обмотке. Сопротивление обмотки рассчитывают по формуле закона Ома:

$$R = U/I.$$

Если напряжение U измерить непосредственно на зажимах обмотки, то этим методом можно определить сопротивление только самой обмотки независимо от длины соединительных проводов. Для получения точных результатов постоянный ток должен быть стабильным, без колебаний, поэтому для питания схемы используют аккумуляторные батареи, а не выпрямительные установки.

Если результаты измерений сопротивления обмоток резко расходятся с указанными в технической документации, то это показывает, что обмотка выполнена неверно. В то же время совпадение результатов не дает оснований для заключения о правильности выполнения обмотки, так как, например, ошибочное соединение катушечных групп в фазе обмотки совсем не повлияет на результаты измерений, наличие короткозамкнутых витков во всыпной обмотке машины

даст отклонение результатов измерения сопротивлений всего на несколько процентов, т. е. в пределах точности измерений и допусков, предусмотренных в документации.

Часто для проверки правильности выполнения обмотки измеряют и сравнивают между собой падение напряжения на нескольких одинаковых элементах обмотки при пропускании по ней тока. Так, например, если соединить все катушки обмотки возбуждения машины постоянного тока последовательно, пропустить по ним ток и вольтметром измерить падение напряжения на катушке каждого полюса, то результаты измерения должны быть одинаковые или очень близкие друг к другу. Заметные отклонения в показаниях вольтметра при подключении его к какой-либо из катушек покажут, что эта катушка имеет дефект. Например, при большем числе витков падение напряжения на ней будет больше, чем на других, а при уменьшенном числе витков или при замыкании нескольких витков — меньшим. Для проведения таких измерений источник тока соединяют с зажимами обмотки постоянными контактами, а к зажимам вольтметра подключают переносные щупы с острыми концами, легкое нажатие на которые дает хороший контакт с проводом обмотки. Сопротивление катушек при этом не рассчитывают. Подобный же метод применяют для контроля правильности соединения секций якоря машины постоянного тока с коллектором. Для этого собирают схему, показанную на рис. 177. Питание подключается рубильником *8* через предохранители *9* к источнику тока — аккумуляторной батарее *10*. Измерения производятся с помощью двойных щупов *2*, в изолированных рукоятках которых укреплено по две иглы. Одни из игл *4* измерительные, более короткие, соединены с милливольтметром *6*, вторые токовые *3* — подвижные. Они опираются на пру-

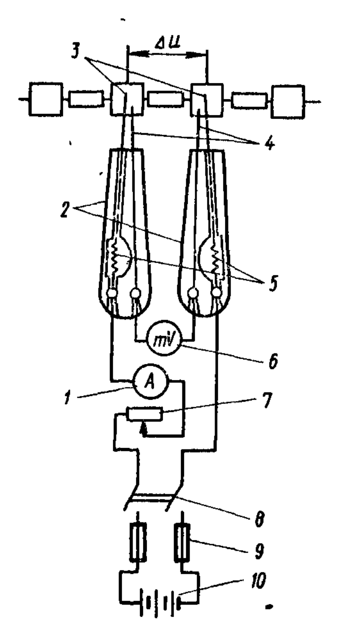


Рис. 177. Схема для контроля обмотки якоря

жины *5* и до измерений выдвинуты из рукоятки больше, чем измерительные. Подвижные иглы соединены с источником тока через амперметр *1* и регулировочное сопротивление *7*.

Измерения проводят следующим образом. Включают источник питания и устанавливают подвижные токовые иглы щупов на соседние пластины коллектора. В цепи схемы появляется ток, замыкающийся через пластины коллекторов, выводные концы секций и обмотку якоря. Регулировочным сопротивлением устанавливают определенный ток (обычно 1–2 А), чтобы не перегревались соединительные провода и токовые щупы. После того как ток установлен, его не меняют на протяжении всех измерений. Нажав на щупы, утапливают подвижные иглы и касаются измерительными иглами тех же коллекторных пластин, к которым присоединены подвижные иглы. По милливольтметру замечают и записывают напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами. Потом переносят щупы на следующую пару пластин и после того, как амперметр покажет тот же ток в цепи, нажимают на них, чтобы коснуться пластин измерительными иглами. Таким образом последовательно обходят все пластины коллектора. Если все секции соединены с коллектором правильно и качество пайки их выводных концов с пластинами хорошее, то показания милливольтметра будут практически одинаковы, так как схемы обмоток якорей полностью симметричны. При ошибке в схеме или плохом контакте секции с коллектором, а также при замыкании витков в секции показания милливольтметра изменяются. Двойные щупы для измерений необходимы для того, чтобы случайно не сжечь милливольтметр, так как при плохом контакте между выводным концом секции и пластиной коллектора или при обрыве одной из секций напряжение между некоторыми коллекторными пластинами будет равно полному напряжению источника питания.

Контроль правильности соединения обмотки якоря на собранной машине часто проводят более простым методом. На коллекторе устанавливают по одной щетке на щеточные болты разной полярности (две щетки на коллекторе) и к ним подключают источник тока. Ток распределяется по всей обмотке якоря. Щупами, соединенными с милливольтметром, последовательно измеряют напряжение между каждой парой коллекторных пластин. Эти напряжения также должны быть одинаковы.

Сопротивление провода зависит от его температуры.

Поэтому контрольные измерения всегда проводят на остывшей машине при температуре обмоток, равной температуре окружающего воздуха. В протоколах измерений обязательно указывают температуру обмоток. В технических документах указывается сопротивление обмоток при 20 °С, которое обозначают R_{20}. Если измерения производились при другой температуре, то для сравнения результатов нужно привести полученное значение сопротивления к температуре 20 °С. Зависимость сопротивления от температуры выражается следующей формулой:

$$R_{t_2} = R_{t_1}(1 + \alpha \Delta t),$$

где: R_{t_1} — сопротивление обмотки при температуре t_1°; R_{t_2} — сопротивление обмотки при температуре t_2°, причем $t_1 < t_2$; Δt — разность температур, °С; α — температурный коэффициент изменения сопротивления для многих чистых металлов, в том числе для меди и алюминия, равный 0,004 1/град.

Если по измерениям, проводимым при $t_1 = 15$ °С, сопротивление обмотки $R_{15} = 0{,}95$ Ом, то сопротивление, приведенное к 20 °С, будет равно

$$R_{20} = R_{15}(1 + \alpha \Delta t) = 0{,}95\,[1 + 0{,}004\,(20 - 15)] = 0{,}97 \text{ Ом.}$$

Согласно ГОСТу расчетная температура обмоток работающей машины с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В принимается равной 75 °С, а с изоляцией классов F и Н — 115 °С, поэтому в технических документах часто указывают сопротивление обмоток при этих температурах, т. е. R_{75} или R_{115}. Результаты измерений в этих случаях приводятся к расчетной температуре. Сопротивление при температуре 115 °С будет больше, чем измеренное при 15 °С в $[1 + 0{,}004\,(115 - 15)] = 1{,}4$ раза, и для той же обмотки составит

$$R_{115} = R_{15} \cdot 1{,}4 = 0{,}95 \cdot 1{,}4 = 1{,}33 \text{ Ом.}$$

§ 69. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК

Изоляция обмоток — не идеальный изолятор. При соединении проводников с сетью через изоляцию на корпус проходит электрический ток. Но этот ток очень мал, так как сопротивление изоляции достигает миллионов омов. Ток через изоляцию не превышает десятых долей миллиампера в машинах низкого напряжения и нескольких миллиампер в машинах высокого напряжения. Измерение сопротивления изоляции обмоток электрических машин вхо-

дит в программу контрольных операций по проверке качества их обмоток. Его измеряют с помощью мегаомметра.

Мегаомметр представляет собой переносной генератор постоянного тока, смонтированный вместе с измерительной системой. Стрелка на шкале мегаомметра показывает отношение напряжения на его зажимах к току, т. е. сопротивление измеряемой цепи.

Существуют мегаомметры на напряжения 500, 1000 и 2500 В. Генератор мегаомметра вращают вручную с помощью его рукоятки, соединенной через повышающий редуктор с валом генератора. Для проведения измерений выводной конец уложенной в машину обмотки соединяют с одним зажимом прибора, а корпус машины – со вторым зажимом и начинают вращать рукоятку. Чтобы на зажимах мегаомметра генерировалось напряжение, указанное в его паспортных данных, частота вращения ручки должна быть не менее указанной на его щитке (обычно 120 об/мин). При меньшей частоте вращения напряженне будет меньше, а при большей центробежный регулятор прибора отсоединит редуктор от вала генератора и напряжение не поднимется выше номинального.

Во время проведения измерений стрелка прибора не сразу останавливается в каком-то определенном положении. Сначала она показывает меньшее сопротивление, постепенно показания увеличиваются и стрелка устанавливается на цифре, определяющей сопротивление изоляции обмотки относительно корпуса. Постепенный подход стрелки к установившемуся значению объясняется тем, что в первые моменты времени в изоляции возникают поляризационные токи, происходит зарядка своеобразного конденсатора, обкладками которого являются проводники обмотки и сталь магнитопровода, а диэлектриком – изоляции обмотки. Эти токи постепенно уменьшаются и после их прекращения остается так называемый сквозной ток утечки, который и характеризует сопротивление изоляции. Поэтому окончательные результаты измерения получают спустя минуту после начала вращения рукоятки мегаомметра. Записывают также показания через 15 с после измерений. По отношению этих показаний (через 15 и 60 с) можно судить о способности изоляции воспринимать заряд. При влажной изоляции эти показания почти одинаковы, при сухой установившееся значение на 30–50% больше промежуточного. Отношение показаний R_{60}/R_{15} называют коэффициентом абсорбции,

его значение характеризует степень увлажнения изоляции.

Все время, пока проводится измерение, т. е. не менее одной минуты, рукоятку мегаомметра необходимо вращать с частотой не менее 120 об/мин. Рукоятка вращается с большим моментом сопротивления, так как она соединена с редуктором, имеющим высокое передаточное отношение. Поэтому измерения можно проводить только вдвоем: один человек вращает рукоятку, другой отмечает показания прибора

Для облегчения работы выпускают мегаомметры с электрическим приводом, в которых вместо рукоятки и редуктора установлен электрический двигатель с нужной частотой вращения. Такие мегаомметры удобней, но для них необходимо подводить напряжение к месту измерений, что вызывает дополнительные затруднения, особенно при измерении сопротивления изоляции машин, установленных на рабочих местах.

Необходимо отметить, что по данным измерений сопротивления изоляции обмоток нельзя окончательно судить о ее качестве, так как сопротивление сухой изоляции будет высоким даже при наличии в ней слабых в электрическом отношении мест – небольших трещин, вспучивании и т. п. Допустимые нормы сопротивления изоляции указывают в технических условиях или ГОСТах на каждые типы машин. Средние требования к сопротивлению изоляции обмоток составляют для машин низкого напряжения около 0,5 МОм и для машин высокого напряжения – около 1 МОм.

Для измерения сопротивления изоляции обмоток, номинальное напряжение которых составляет 127–660 В, можно пользоваться только мегаомметром с напряжением 1000 В, так как при применении мегаомметра на напряжение 2500 В изоляция может быть пробита. Для обмоток с напряжением, меньшим 127 В, пользуются только мегаомметром на 500 В, для обмоток с номинальным напряжением 3000 В и более – мегаомметром на 2500 В, так как мегаомметры на более низкое напряжение будут показывать большое сопротивление изоляции. В связи с этим часто для измерений сопротивления изоляции нескольких обмоток одной и той же машины, имеющих разные номинальные напряжения, приходится использовать различные приборы. Так, например, сопротивление изоляции обмоток статора синхронного генератора с номинальным напряжением 6000 В

измеряют мегаомметром с напряжением 2500 В, а сопротивление изоляции обмотки возбуждения той же машины – мегаомметром на 1000 или 500 В в зависимости от номинального напряжения обмотки возбуждения.

В процессе изготовления электрической машины измеряют не только сопротивление изоляции обмоток, но и всех изолированных деталей относительно корпуса: изоляции коллектора, контактных колец, щеточных болтов и др.

§ 70. КОНТРОЛЬ ОБМОТОК, УЛОЖЕННЫХ В ПАЗЫ

Контроль правильности намотки определенного числа витков в катушках, положения катушек в пазах и соединений этих катушек между собой проводится в процессе изготовления и укладки обмотки. После того как обмотка уложена, запаяны и изолированы катушечные и межгрупповые соединения в статорах машин переменного тока, а в якорях машин постоянного тока выводы секций соединены с коллекторными пластинами, выполняют еще одну контрольную операцию, которая позволяет выявить возможные дефекты в изготовлении и укладке обмотки. Для этого применяют электронные приборы со специальными схемами.

Существует много разновидностей приборов для контроля обмотки (СМ, ЕЛ и др.). Рассмотрим принцип действия одного из них, нашедшего широкое применение на электромашиностроительных заводах – прибора ЕЛ. С помощью прибора ЕЛ не производят каких-либо измерений, а сравнивают полные сопротивления одинаковых элементов обмотки. Катушки уложенной в пазы обмотки обладают активным и индуктивным сопротивлениями. Активное сопротивление зависит от размеров и длины провода, а индуктивное – от числа и расположения витков в пазах.

Аппараты ЕЛ состоят из нескольких блоков, смонтированных в одном корпусе: электронно-лучевой трубки, разверток луча по горизонтальной и вертикальной осям и импульсного генератора. Электронно-лучевая трубка обладает заметным послесвечением, т. е. способностью сохранять на экране некоторое время видимый след луча. Если к зажимам прибора подключить какой-либо элемент обмотки, например выводы катушки или фазы обмотки статора, и включить генератор импульсов, то каждый импульс отразится на экране движущимся световым пятном. Из-за послесвечения будет видна вся траектория хода луча – кривая, имеющая ряд изгибов. Амплитуда колебания луча

и число изгибов будут зависеть от электрических параметров подключенной к зажимам катушки или обмотки – ее активного и индуктивного сопротивлений, числа и расположения витков и др. По виду и характеру одной этой кривой еще нельзя сделать заключение о правильности выполненной обмотки, так как заранее рассчитать ее вид по данным обмотки практически невозможно Но при любом изменении в числе витков подключенной обмотки, в расположении ее отдельных катушек, при наличии замкнутых накоротко витков или любых других отклонений вид кривой изменится. Это используется в приборе: к трем зажимам прибора подключат не один, а сразу два элемента обмотки, которые должны быть одинаковы, например две фазы обмотки статора трехфазной машины. Причем к одному зажиму прибора (рис. 178, *а*) подсоединяют концы обеих фаз, а к двум другим – начала каждой из фаз. Генератор прибора подает импульсы поочередно то на начало одной фазы, то на начало другой. Из-за послесвечения экрана на нем одновременно видны кривые от обоих импульсов. Если обе фазы полностью одинаковы, то эти кривые сливаются и на экране высвечивается только одна кривая (рис. 178, *б*). Если же фазы в чем-либо отличаются одна от другой, то на экране прибора видны две разные кривые, или одна, имеющая различные петли (рис. 178, *в*). Это и позволяет судить о наличии дефектов в одной из подключенных к прибору обмоток. Так же сравнивают одну из первых двух с третьей фазой обмотки.

Таким образом с помощью аппарата ЕЛ устанавливают идентичность или неидентичность двух сравниваемых эле-

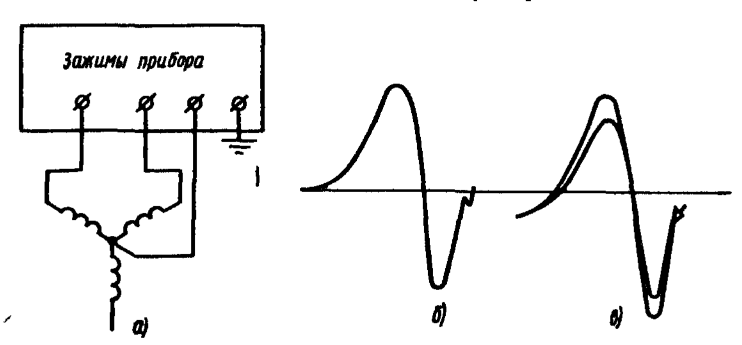


Рис. 178. Схема подключения трехфазной обмотки к прибору ЕЛ (*а*) и кривые на экране прибора (*б* – обмотка не имеет дефектов, *в* – в одной фазе витковое замыкание)

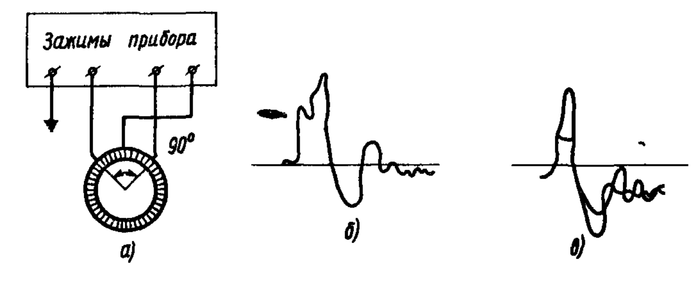


Рис 179. Схема подключения обмотки якоря к прибору ЕЛ (*а*) и кривые на экране прибора (*б* – обмотка якоря не имеет дефектов, *в* – в обмотке якоря витковое замыкание)

ментов обмотки. Такое сопоставление достаточно для проверки правильности выполнения обмотки, так как вероятность повторения одной и той же ошибки, например, замыкания витков, расположенных на одинаковом расстоянии от начал фаз обмотки, очень мала.

Аппарат ЕЛ используют также для проверки правильности намотки отдельных многовитковых катушек, например, катушек параллельного возбуждения машин постоянного тока. В этом случае одну из катушек принимают за эталон и оставляют постоянно соединенной с прибором, а другие катушки подсоединяют поочередно. При раздвоении кривой на экране прибора подсоединенная катушка бракуется.

Для проверки правильности выполнения обмотки якоря машины постоянного тока зажимы аппарата соединяют с электродами, прижатыми к пластинам коллектора. Два электрода, соединенные с зажимами прибора, прикладывают к пластинам, расположенным под углом 90 или 120 , а электрод, соединенный с третьим зажимом, – к пластине, находящейся строго посередине между ними (рис. 179, *а*). Из-за симметрии обмотки между каждой парой зажимов оказываются включенными одинаковые участки обмотки и при отсутствии в них дефектов на экране прибора будет видна только одна кривая (рис. 179, *б*). Если на проверяемом участке обмотки имеются плохие контакты между выводными концами секций и пластинами, перепутаны выводные концы секций или есть замыкания витков, то кривые раздвоятся (рис. 179, *в*).

Для проверки всей обмотки якоря электроды последовательно переставляют по пластинам коллектора, т. е. для проверки каждого коллектора производят три или четыре подключения.

§ 71. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ МАРКИРОВКИ ВЫВОДНЫХ КОНЦОВ ФАЗ ОБМОТКИ СТАТОРА

ГОСТом установлено, что при соединении начала первой фазы обмотки *C1* с фазой *A* сети, второй фазы обмотки *C2* с фазой *B* и третьей фазы обмотки *C3* с фазой *C* направление вращения электрической машины должно быть правым, т. е. машина должна вращаться по часовой стрелке, если смотреть со стороны выступающего (выводного) конца вала. Это правило не распространяется на реверсивные машины, на машины, имеющие два выступающих конца вала, и на машины, по своей конструкции предназначенные для левого вращения.

Для проверки правильности обозначений выводов обмотки все концы фаз (*C4*, *C5* и *C6*) соединяют между собой, а начала фаз *C1*, *C2* и *C3* соединяют соответственно с фазами *A*, *B* и *C* сети и на обмотку подают пониженное по сравнению с номинальным напряжение. Ток обмотки статора возбуждает вращающееся магнитное поле. Направление вращения поля можно определить, если поместить внутри статора в плоскости, перпендикулярной его оси, металлический легко вращающийся на своей оси диск. От взаимодействия токов, наведенных в диске вращающимся магнитным полем, и поля обмотки статора диск начнет вращаться. По направлению его вращения судят о направлении вращения поля. При правильной маркировке выводных концов фаз и соединении их с сетью диск должен вращаться по часовой стрелке, если смотреть от выводного конца вала.

В практике для определения направления вращения поля используют прибор – фазоуказатель, состоящий из легкого алюминиевого диска и рукоятки из изоляционного материала, на конце которой он свободно вращается.

§ 72. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Контрольные операции не позволяют судить об электрической прочности изоляции обмоток; она проверяется только при испытаниях высоким напряжением. Чтобы изоляция обмоток не вышла из строя во время работы машины, ее выполняют с определенным «запасом» электрической прочности, т. е. рассчитывают на напряжение большее, чем номинальное напряжение машины. Поэтому испытательное напряжение корпусной изоляции в несколько раз превышает номинальное напряжение.

Проверка электрической прочности изоляции обмотки готовой машины входит в программу приемо-сдаточных испытаний. Кроме того, изоляция испытывается в процессе изготовления и укладки катушек в пазы. Этот вид испытаний называют пооперационным, так как его проводят после определенных операций, различных для каждого типа обмоток.

Испытательные напряжения во время приемо-сдаточных испытаний установлены ГОСТ 183 – 74 в зависимости от типа машины, ее мощности и номинального напряжения. Изоляция обмоток от корпуса и между отдельными фазами должна выдерживать испытательное напряжение частоты 50 Гц в течение 1 мин. Для машин мощностью до 15 кВт включительно на номинальное напряжение до 660 В при массовом выпуске допускается проводить испытания повышенным на 20 % по сравнению с установленным ГОСТом напряжением в течение 1 с. Испытательное напряжение корпусной изоляции любой из обмоток всегда больше, чем двух- и трехкратное номинальное напряжение.

Для некоторых обмоток испытательное напряжение устанавливается еще бóльшим. Так, для обмоток возбуждения отдельных типов синхронных машин ГОСТом предусмотрено десятикратное по сравнению с номинальным испытательное напряжение. Это делается для того, чтобы выявить малейшие дефекты в изоляции, так как при работе машины они могут увеличиться и привести к выходу ее из строя.

Если дефект изоляции обнаружен только во время приемо-сдаточных испытаний (пробой корпусной изоляции или изоляции между фазами обмотки), т. е. уже в готовой машине, то для его устранения требуются большие затраты рабочего времени и материалов. Машину с пробитой изоляцией чаще всего приходится отправлять в ремонтный цех для замены катушек обмотки с дефектной изоляцией. В статорах машин с всыпной обмоткой полностью заменяют всю обмотку, так как после пропитки проводники обмотки настолько прочно держатся в пазах, что вынуть и заменить одну из катушек без повреждения соседних практически невозможно. Поэтому изоляцию обмоток испытывают также и в процессе изготовления обмоток. Операции, после которых проводят такие испытания, зависят от типа и конструкции обмоток. Изоляцию катушек из прямоугольного провода первый раз испытывают после компаундирования или после запечки гильз, потом после установки в пазы

и заклиновки и еще раз после соединения, пайки и изолировки схемы.

Катушки всыпной обмотки и обмотки из подразделенных катушек до установки в пазы не изолируются, так же как и катушки якорей машин небольшой мощности. Поэтому изоляцию таких обмоток испытывают первый раз после укладки катушек в пазы и заклиновки, второй раз после соединения, пайки и изолировки схемы в машинах переменного тока или после соединения обмотки с коллектором в якорях машин постоянного тока и намотки бандажей.

Напряжения при пооперационных испытаниях ГОСТ не устанавливает. Они определяются заводскими нормалями. Шкала испытательных напряжений строится так, чтобы каждое предыдущее напряжение было больше последующего на 10—15 %, а при последнем пооперационном испытании оно было бы больше, чем напряжение при приемо-сдаточных испытаниях, также на 10—15 %. Такое построение шкалы испытательных напряжений позволяет отбраковать дефектную изоляцию уже на первых этапах изготовления обмотки и тем самым сократить время на исправление дефектов.

Высокое напряжение во время испытаний представляет большую опасность для жизни человека, поэтому все испытания электрической прочности изоляции проводятся на специально оборудованных участках, расположенных на испытательных станциях. Испытательные участки ограждены металлической сеткой. Вход на их территорию разрешен только лицам, принимающим непосредственное участие в испытаниях, через дверь, оборудованную блокировочными контактами.

Принципиальная схема испытательной установки приведена на рис. 180. Испытания проводятся напряжением промышленной частоты 50 Гц. От заводской сети напряжение через разъединитель и блокировочные контакты *БК* подводится к контактору *К1*. Блокировочные контакты соединены с концевыми выключателями на двери ограждения испытательного участка. Во время испытаний на нем не должен находиться никто из людей и двери должны быть закрыты. Если во время испытаний кто-либо случайно откроет двери, то сработает концевой выключатель, блокировочный контакт разомкнется и цепь отключится. От контактора напряжение через плавкие предохранители подается на регулятор напряжения *РН*. В качестве регулятора напряжения может быть использован автотрансформатор

или индукционный регулятор. В последнем случае на первичную обмотку индукционного регулятора подают трехфазное напряжение, а со вторичной обмотки снимают однофазное. Выходные концы регулятора напряжения подключены через амперметр и защитное сопротивление к контактору *K2*, напряжение на зажимах которого контролируется вольтметром *V1*.

Контактор включается в цепь обмотки низкого напряжения испытательного трансформатора *T1*. Один выводной конец обмотки высокого напряжения испытательного трансформатора заземлен. Второй конец соединяется с испытуемой обмоткой. Параллельно с ней, на выводы обмотки высокого напряжения испытательного трансформатора подключены воздушный разрядник и измерительный трансформатор *T2*. Расстояние между шарами воздушного разрядника устанавливается таким, чтобы при напряжении, превышающем испытательное, его воздушный промежуток пробивался и закорачивал цепь. При этом срабатывают предохранители и цепь разрывается. Испытательное напряжение измеряют с помощью измерительного трансформатора *T2* и включенного на его обмотку низкого напряжения вольтметра *V2*. Определение напряжения на высокой стороне испытательного трансформатора по показаниям вольтметра *V1* с учетом коэффициента трансформации неточно, так как при нагрузке в испытательном трансформаторе наблюдается

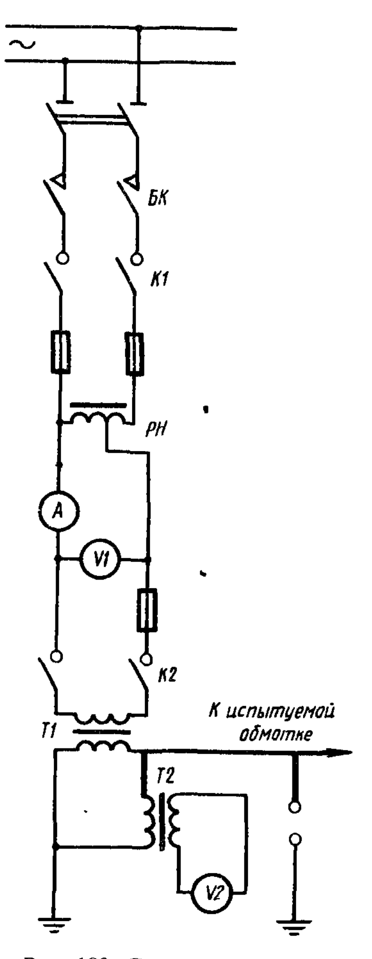


Рис. 180. Схема испытательной установки

большое падение напряжения. Вместо измерительного трансформатора и вольтметра некоторые испытательные станции оборудованы киловольтметрами, которые позволяют непосредственно измерять напряжение, поданное на испытуемую обмотку.

Испытания начинают с напряжения, не превышающего $^1/_3$ испытательного, и постепенно повышают его до полного испытательного напряжения. Повышать напряжение следует плавно или ступенями, не превышая 5% его окончательного значения. Время подъема напряжения от половины до окончательного значения не должно быть менее 10 с. Полное испытательное напряжение выдерживают в течение 1 мин, после чего плавно снижают до $^1/_3$ его значения и отключают контакторы *K1* и *K2* и разъединитель схемы. Лишь после этого в ограждение на испытательном участке разрешен вход лицам, производящим испытание.

Несмотря на то что бóльшая часть схемы испытательной установки находится под низким напряжением (провода высокого напряжения показаны на рис. 180 толстыми линиями) и все измерительные приборы расположены на пультах управлений за пределами участков схемы с высоким напряжением, все испытания разрешается проводить только в резиновых перчатках, стоя на резиновых ковриках.

Испытательные установки помимо плакатов, предупреждающих о недопустимости входа в огражденные участки, оборудованы также световой сигнализацией. Красная лампа над дверью включается во время проведения испытаний. На многих дверях установлены также электрические замки: при включении испытательной установки под напряжение дверь автоматически запирается и не может быть открыта до тех пор, пока напряжение не снято.

Чтобы испытать электрическую прочность изоляции отдельных катушек до укладки их в пазы, пазовые части катушек плотно обертывают лентой из металлической (алюминиевой) фольги, наматывая ее втреть нахлеста на длину, равную длине стали машины. Несколько испытуемых катушек одновременно устанавливают на столе испытательного участка на поперечные брусья так, чтобы лобовые части катушек оказались приподнятыми и не касались стола. Под один из брусьев укладывают заземленный металлический электрод, соприкасающийся с металлической фольгой на пазовых частях катушек. Выводные концы катушек соединяют медной проволокой, подключают ее к зажиму высокого напряжения испытательного трансформатора и про-

изводят испытание. Если какая-либо из катушек оказалась некачественная, то ее изоляция пробивается.

Амперметр в схеме показывает сильное увеличение тока, а вольтметры – падение напряжения. После отключения схемы место пробоя изоляции легко определить, так как фольга над пробитым участком прогорает, а вокруг него видны цвета побежалости из-за сильного нагрева. Небольшое прогоревшее отверстие заметно также и на изоляции катушки.

Для испытания изоляции катушек после укладки их в пазы и заклиновки до соединения схемы выводные концы всех катушек соединяют тонкой проволокой и подключают к обмотке испытательного трансформатора, а корпус машины заземляют.

Для испытания изоляции после соединения схемы так же, как и во время приемо-сдаточных испытаний, испытательное напряжение подают только на одну из фаз обмотки, а заземляют и корпус машины и другие фазы. Таким образом одновременно испытывается как изоляция обмотки относительно корпуса, так и между фазами.

Порядок проведения испытаний, т. е. постепенное поднятие напряжения, выдержка в течение одной минуты и плавное уменьшение его остаются одинаковыми для всех видов испытаний электрической прочности изоляции.

§ 73. ИСПЫТАНИЕ МЕЖДУВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Витковую изоляцию испытывают лишь в машинах, обмотка которых состоит из многовитковых (двухвитковых и более) катушек. Испытательное напряжение нельзя приложить к каждому витку раздельно, так как витки соединены в катушках последовательно и не имеют отдельных выводов. Поэтому для испытания междувитковой изоляции обмоток приходится применять другие способы.

Напряжение между витками обмотки равно напряжению, приложенному к фазе, деленному на число последовательно соединенных витков фазы. Чтобы повысить это напряжение, надо увеличить напряжение на выводах обмотки. Согласно ГОСТ 183–74 испытание междувитковой изоляции производят при повышении напряжения на зажимах машины на 30 % по сравнению с номинальным. Такое напряжение изоляция должна выдержать в течение 3 мин.

Прочность витковой изоляции обмоток якорей, катушек возбуждения, многовитковых обмоток статоров и фазных

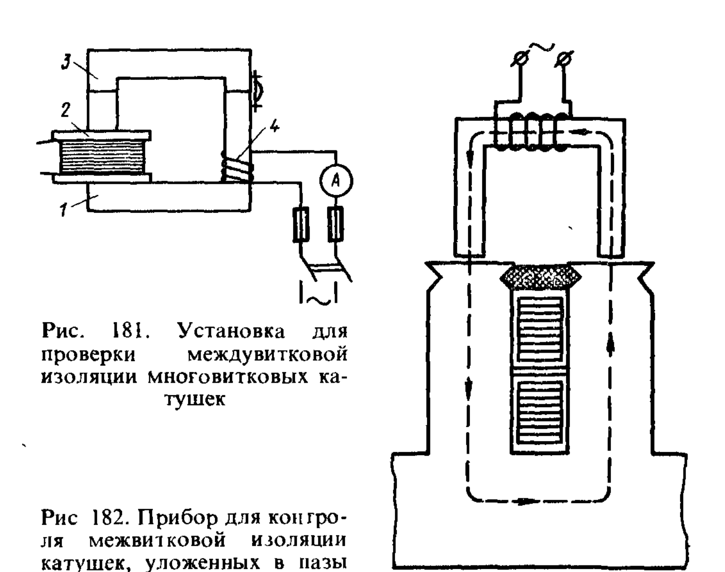


Рис. 181. Установка для проверки междувитковой изоляции многовитковых катушек

Рис 182. Прибор для контроля межвитковой изоляции катушек, уложенных в пазы

роторов асинхронных машин может быть испытана также наведенной в них эдс. Для проверки изоляции многовитковых катушек возбуждения используют простое приспособление (рис. 181) – магнитопровод *1* с откидным ярмом *3*. На один стержень магнитопровода надевают испытуемую катушку *2*. На другом стержне размещена катушка возбуждения прибора *4*. При включении в сеть катушки возбуждения в магнитопроводе возникает магнитный поток, который индуцирует эдс в витках испытуемой катушки. Причем напряжение между ее витками равно напряжению, приходящемуся на один виток катушки возбуждения. При пробое витковой изоляции в испытуемой катушке образуется замкнутый виток, в котором под влиянием индуцированной эдс возникает большой ток. Ток в цепи прибора также возрастает, а испытуемая катушка начинает нагреваться.

Для испытания междувитковой изоляции многовитковых катушек статорной обмотки применяют основанные на том же принципе приборы, состоящие из двух П-образных магнитопроводов, на одном из которых имеется обмотка возбуждения, а на втором – измерительная обмотка. Для испытания витковой изоляции отдельных катушек, не уложенных в пазы, оба магнитопровода надевают на катушку и замыкают их стержни, образуя замкнутые магнитные цепи. Обмотка возбуждения подключается к источнику

напряжения высокой частоты или генератору импульсов напряжения. Поток, создаваемый намагничивающей силой обмотки возбуждения, индуцирует эдс в витках испытуемой катушки. При пробое изоляции между ее витками в образовавшемся замкнутом контуре возникает ток, который в свою очередь наводит эдс в витках измерительной катушки. Появление тока регистрируется милливольтметром в ее цепи.

Витковая изоляция катушек, уложенных в пазы, испытывается аналогичным прибором (рис. 182). Оба магнитопровода устанавливаются на сталь статора над испытуемой катушкой так, чтобы поток возбуждения замыкался под пазом, охватывая ее витки. Ток, появляющийся при витковом замыкании в замкнутом накоротко витке, возбуждает эдс в измерительной катушке второго магнитопровода, которая регистрируется прибором, подключенным к ее выводам.

§ 74. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ХОЛОСТОМ ХОДУ И ПОД НАГРУЗКОЙ

В программах контрольных испытаний (см. § 66) предусматривается проведение испытаний электрических машин на холостом ходу и под нагрузкой. Эти испытания проводятся на испытательных станциях. Испытуемая машина устанавливается на фундаментную плиту, имеющую приспособления для крепления машин различных размеров. К зажимам ее коробки выводов подключаются выводы смонтированной на испытательной станции схемы с включенными измерительными приборами, расположенными на пульте управления. Во время испытаний снимаются различные характеристики: холостого хода, нагрузочная и т. п.

Конкретные программы испытаний установлены ГОСТом для различных видов испытаний (приемо-сдаточных, типовых, периодических) и зависят от типа машин (постоянного тока, синхронные, асинхронные) и от их мощности. В режиме холостого хода испытываются все виды машин.

При испытаниях под нагрузкой генераторы включают на нагрузочные сопротивления. В качестве нагрузочных устройств для испытания двигателей используются тормоза различной конструкции, балансирные машины или тарированные генераторы, которые в свою очередь включаются на нагрузочные сопротивления.

§ 75. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Проведение полной программы приемо-сдаточных и пооперационных испытаний требует значительных затрат рабочего времени, которое расходуется в основном на различные соединения и на регистрацию данных измерений. В то же время испытательные и измерительные схемы и приборы в них при массовом выпуске однотипных электрических машин должны быть одни и те же, испытательные напряжения одинаковы, а показания приборов лишь незначительно отличаться. Это дает возможность автоматизировать процесс испытаний электродвигателей массовых серий.

Для пооперационных испытаний асинхронных двигателей малой мощности используют автоматическую установку АКО-19. На ней производят испытания в технологическом потоке изготовления статоров после укладки обмотки и бандажирования лобовых частей (перед пропиткой).

Установка (рис. 183) состоит из испытательного стола *1* с поворотной планшайбой и стенда с аппаратурой и пуль-

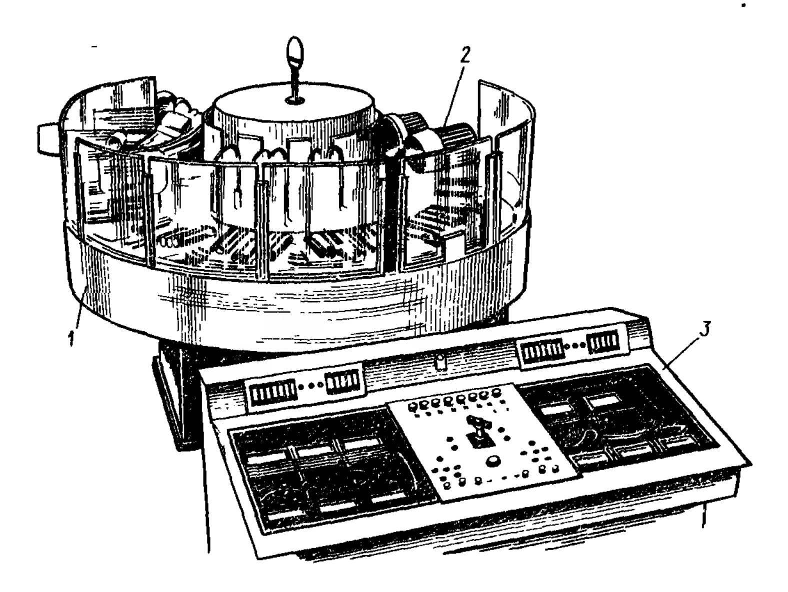


Рис 183. Установка АКО-19 для испытаний асинхронных двигателей

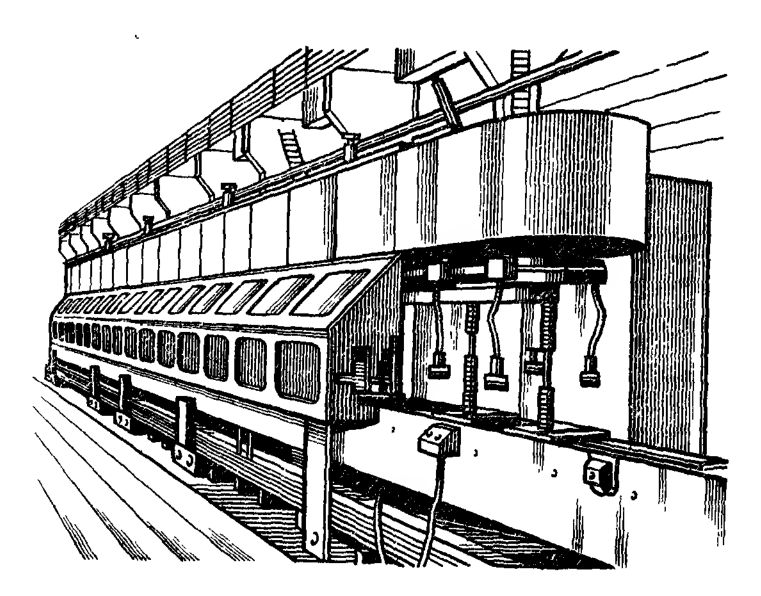


Рис 184. Автоматизированная испытательная станция АИМ

том управления *3*. Оператор устанавливает испытуемые статоры *2* на планшайбу и соединяет выводные концы фаз их обмоток со схемой установки. Одновременно на столе размещается восемь статоров. Планшайба периодически поворачивается на $^1/_8$ часть окружности, таким образом каждый статор последовательно занимает восемь различных положений, на каждом из которых производится какое-либо испытание или измерение. Контрольные операции проводятся автоматически. Испытывается электрическая прочность изоляции обмотки относительно корпуса, электрическая прочность межфазовой и междувитковой изоляции, контролируется правильность маркировки выводных концов обмотки и измеряется сопротивление каждой ее фазы. Установку обслуживает один оператор. За один час на ней могут пройти испытания до 80 статоров.

Аналогично работают автоматические испытательные станции типа АИМ, предназначенные для проведения приемо-сдаточных испытаний асинхронных двигателей серии 4А (установка АИМ-18 – для испытаний двигателей мощностью 2,2–7,5 кВт, АИМ-18А – для двигателей мощностью 4–11 кВт). Общий вид станции показан на рис. 184. Она

состоит из транспортного и коммутирующего конвейеров с гидравлическим приводом, шкафов с аппаратурой управления и высоковольтной аппаратуры, стабилизатора, силовых трансформаторов и пультов управления. На станции последовательно измеряют ток и потери холостого хода, ток и потери короткого замыкания, испытывают электрическую прочность изоляции Двигатели выбраковываются по результатам каждого испытания. Дефектный двигатель автоматически отключается от дальнейших испытаний. За один час два оператора на установке АИМ-18 испытывают 94 статора и 80 статоров на АИМ-18А.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Какие виды контрольных испытаний электрических машин вы знаете?

2 В чем заключаются приемо-сдаточные испытания асинхронных машин?

3 Какие машины подвергаются приемочным испытаниям?

4 Какие испытания называют типовыми?

5 Какими приборами можно измерить активное сопротивление обмоток?

6 Как зависит сопротивление обмотки от ее температуры?

7 Почему для проверки обмотки якоря (см рис 177) применяют двойные щупы? Можно ли проводить эти измерения с помощью обычного одинарного щупа?

8 Какими приборами измеряют сопротивление изоляции?

9 Изменится ли коэффициент абсорбции после сушки обмотки?

10 На чем основан принцип действия аппаратов типа ЕЛ?

11 Какие испытания называют пооперационными?

12 Какой документ устанавливает нормы приемо-сдаточных испытаний электрической прочности изоляции обмоток?

13 По рис 180 поясните назначение элементов схемы испытательной установки

14 Как испытывают электрическую прочность междувитковой изоляции?

15 Опишите установку для проведения пооперационных испытаний АКО-19

ГЛАВА XV
РЕМОНТ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 76. СИСТЕМА ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА

Электрические машины рассчитываются на длительный срок безремонтной эксплуатации, но некоторые из них выходят из строя значительно раньше Причинами этого

являются различные скрытые дефекты изоляции или подшипниковых узлов, неправильные эксплуатация, транспортировка и монтаж.

Выход из строя электрической машины во время эксплуатации вызывает остановку отдельных механизмов, следствием чего может быть аварийная остановка всего цеха, завода и т д В то же время большинство аварийных остановок может быть предотвращено при правильной организации системы планово-предупредительного ремонта (ППР) Эта система заключается в проведении планомерных периодических осмотров и ремонтов установленного электрооборудования Ремонт электрической машины в заранее обусловленные планом сроки всегда сокращает вынужденные простои оборудования.

По объему выполняемых работ различают следующие виды ремонта электрических машин: малый или текущий, средний и капитальный.

Во время текущего ремонта производят внешний осмотр машины на месте установки и в зависимости от ее типа выполняют те или иные измерения и профилактические работы. Контролируют прочность крепления машины, состояние подшипников. В коллекторных машинах и в машинах с контактными кольцами проверяют щеточный аппарат и при необходимости заменяют щетки, оценивают состояние наружной поверхности коллектора и контактных колец; проверяют состояние контактов в коробке выводов, измеряют сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса и друг от друга.

Крупные электрические машины во время текущих ремонтов обычно разбирают частично или полностью. Осматривают лобовые части обмоток, проверяют состояние их изоляции и крепления между собой и с бандажным кольцом; состояние бандажей на лобовых частях якорей и фазных роторов. В разобранных машинах проверяют состояние стали статора и ротора, прочность посадки пазовых клиньев, состояние бандажей на пазовой части якорей. Мелкие неисправности, обнаруженные во время осмотра, устраняют. При обнаружении дефектов, которые не могут быть исправлены за время, отведенное на текущий ремонт, в отдельных случаях заменяют машину. Если обнаруженная неисправность позволяет эксплуатировать машину еще какое-то время без угрозы аварийной остановки, то назначается срок проведения ремонта, согласованный с общим планом ремонтных работ предприятия.

Во время среднего ремонта машину разбирают и помимо работ, проводимых при текущих ремонтах, проверяют более тщательно состояние ее механических деталей, подшипниковых узлов, обмоток. Производят замену неисправных деталей, протачивают, шлифуют и продороживают коллектор. В крупных машинах при необходимости производят частичный ремонт обмоток.

Капитальный ремонт электрических машин в большинстве случаев связан с полной заменой обмоток, ремонтом коллектора, контактных колец, вала, подшипников, станины и других частей. После капитального ремонта машина подвергается приемо-сдаточным испытаниям по той же программе, что и новая, выпущенная заводом. Очень часто во время капитального ремонта машину модернизируют. изменяют конструкцию обмоток, как правило, устанавливают новую изоляцию из современных материалов, может быть повышен класс нагревостойкости изоляции, улучшена система вентиляции, система крепления лобовых частей обмоток и т. п. В отдельных случаях повышают мощность машины и изменяют ее другие паспортные данные. Все проведенные изменения должны быть указаны на паспортном щитке, укрепляемом на станине после капитального ремонта рядом со щитком завода-изготовителя. На этом же щитке фиксируются организация, проводившая ремонт, и время его проведения.

Текущий и средний ремонт электрических машин, как правило, осуществляют на месте их установки, капитальный ремонт машин малой и средней мощности — в электроремонтных цехах, организованных на крупных предприятиях, или на специализированных электроремонтных заводах, а электрических машин большой мощности из-за сложности и большой стоимости транспортировки — на месте их установки. Для этой цели в цехе завода, где установлен ремонтируемый двигатель, или в машинном зале электростанции, где размещается неисправный генератор, организуют ремонтную площадку, оснащенную необходимым для ремонта оборудованием.

При проведении капитального ремонта во время разборки машины оценивают состояние и пригодность к дальнейшей работе каждой ее детали. Ремонт должен проводиться комплексно, с тем чтобы в капитально отремонтированной машине не оставалось «слабых» мест или деталей, расчетный срок работы которых уже истекает, так как это может привести к необходимости повторных

ремонтов недавно прошедших капитальный ремонт двигателей и генераторов.

Ремонт различных частей электрических машин имеет свои особенности и выполняется рабочими разных специальностей. Обмотчики, как правило, ремонтируют только обмотки статоров, роторов, якорей и катушки возбуждения. Ремонт обмоток по технологии и объему работ разделяется на частичный и капитальный.

§ 77. ЧАСТИЧНЫЙ РЕМОНТ ОБМОТОК

В статорах машин переменного тока производят частичный ремонт только обмоток из прямоугольного провода. Частичный ремонт всыпных обмоток практически невыполним, так как все их проводники после пропитки лаком прочно склеены между собой и в пазовой и в лобовых частях. Отделить один проводник для того, чтобы подызолировать поврежденное место или заменить межфазную изоляцию, невозможно без повреждения изоляции соседних проводников и катушек.

Частичный ремонт обмоток из прямоугольного провода выполняют в тех случаях, когда повреждение изоляции имеет чисто местный, случайный характер, а не вызвано общим старением всей изоляции машины. Повреждения изоляции обмоток вызывают различные виды замыканий: обмотки на корпус, между фазами и витков между собой (витковое замыкание). Замыкание обмотки на корпус машины большей частью происходит из-за пробоя изоляции в пазовой части катушек.

Определить место замыкания можно несколькими способами. Прежде чем воспользоваться каким-либо способом, нужно внимательно осмотреть обмотку статора. Замыкание обмотки на корпус наиболее часто происходит в местах выхода пазовой части катушек из пазов. Его можно легко обнаружить по следам подгара изоляционного материала. Такие же следы подгара и копоти часто бывают видны на краях пазовых клиньев, если пробой изоляции произошел в середине паза. Если при осмотре обмотки место повреждения не обнаружено, то можно воспользоваться наиболее быстрым, но в то же время наиболее опасным способом — прожиганием места замыкания. Корпус статора заземляют, а на вводы обмотки подают напряжение, которое постепенно повышают до тех пор, пока над поврежденным участком не покажется дымок. Опасность

этого метода заключается в том, что при длительной выдержке под напряжением место замыкания сильно разогревается и может быть повреждена изоляция соседних катушек и витков обмотки.

Этот метод часто не дает результата, если проводники в месте пробоя оплавились и образовали хороший электрический контакт между обмоткой и корпусом, который при подключении напряжения на обмотку нагревается не так сильно и его место нельзя найти по дыму.

Обнаружить место замыкания на корпус или между фазами можно также методом последовательного подразделения обмотки на ряд частей. Вначале с помощью мегаомметра или при устойчивом «металлическом» замыкании с помощью контрольной лампы определяют фазу обмотки с поврежденной изоляцией. После этого начало и конец фазы соединяют с источником постоянного тока (рис. 185) и с помощью милливольтметра, один вывод которого соединен с корпусом машины и с другими фазами, а второй – с игольчатым щупом, отыскивают катушку с поврежденной изоляцией. Для этого игольчатым щупом прибора, прокалывая изоляцию в местах соединения катушек, измеряют напряжение между корпусом и проводниками всех катушек поочередно. На выводах поврежденной катушки сопротивление будет самое маленькое из всех измеренных или равно нулю. На выводах, следующих по ходу измерений катушек, напряжение изменит полярность и будет постепенно возрастать. Найденная таким образом катушка отсоединяется от схемы. С помощью мегаомметра или контрольной лампы проверяют правильность определения места замыкания.

Найти место замыкания между витками обмотки труднее, чем место замыкания на корпус или между фазами. Наиболее удобно фаза или катушка с поврежденной витковой изоляцией определяется с помощью приборов и методов, описанных в § 73.

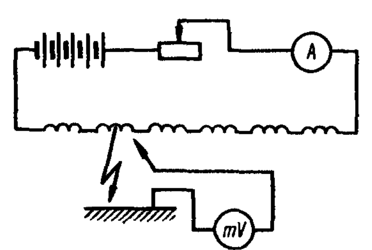


Рис 185. Схема определения места пробоя изоляции обмотки на корпус

После того как характер и место повреждения изоляции установлены, решают вопрос об объеме и способах ремонта. Повреждение корпусной изоляции в лобовых частях обмотки иногда может быть устранено без выемки катушек из пазов. В этом случае поврежденную лобовую часть несколько приподнимают, изоляцию в месте пробоя срезают «на конус» и вокруг всей катушки наматывают несколько слоев (число слоев в зависимости от напряжения машины и толщины изоляции лобовой части) микаленты или стекломикаленты вполнахлеста с заходом верхних слоев на неповрежденную часть изоляции. Лента должна быть промазана изоляционным лаком и хорошо утянута, чтобы по возможности избежать возможных включений воздуха между слоями нанесенной изоляции. Если пробой произошел между фазами обмотки, то таким же образом ремонтируют лобовую часть второй катушки, после чего между ними устанавливают дополнительную изоляционную прокладку. При срезании поврежденного участка изоляции нужно очень внимательно осмотреть очищенное место, так как часто при пробое корпусной изоляции повреждается также витковая и проводниковая изоляции.

Если повреждена изоляция на пазовой части катушки, то местный ремонт изоляции проводить нельзя, так как электрическая прочность отремонтированного участка при той же толщине изоляции всегда меньше, чем остальной изоляции катушки. В этом случае при частичном ремонте обмотки катушку заменяют резервной или специально изготовленной для замены новой катушкой обмотки. Если поврежденная катушка вынута аккуратно, можно, сняв пробитую корпусную изоляцию, заменить ее новой. Однако конструкция новой изоляции должна быть такой же, как и в других катушках, что не всегда можно выполнить в условиях ремонта.

Замена поврежденной катушки обмотки статора требует высокого мастерства обмотчиков. Для того чтобы вынуть одну катушку двухслойной обмотки из пазов, приходится поднимать несколько катушек, так как лобовую часть катушки, лежащую в нижнем слое, можно освободить только в том случае, если вынуть из пазов и отогнуть к центру статора по одной стороне у всех катушек, находящихся в пазах, на расстоянии шага обмотки.

Место замыкания на корпус обмоток якоря и фазных роторов асинхронных двигателей прежде всего отыскивают

тщательным осмотром. Если осмотром найти место пробоя не удается, то используют те же методы, что и для обнаружения замыкания на корпус или между фазами статорных обмоток. Если место пробоя обнаружено в пазовых или лобовых частях обмотки, снимают бандажи и расклинивают нужные пазы ротора и осмотром или с помощью приборов окончательно определяют поврежденную катушку. Снимать бандажи с лобовых частей до приблизительного определения места повреждения не рекомендуется, так как освобожденные от натяга лобовые части обмотки приподнимаются и замыкание обмотки может прекратиться. В этом случае найти поврежденное место много труднее. При любом повреждении изоляции стержня обмотки фазного ротора его вынимают из пазов и переизолируют.

Чтобы вынуть стержень из паза, приходится разгибать одну его лобовую часть. Это можно сделать только, если распаять и отогнуть лобовые части нескольких соседних стержней. Если стержень с поврежденной изоляцией располагается в нижнем слое паза, то предварительно необходимо вынуть несколько стержней верхнего слоя, чтобы иметь доступ к лобовым частям стержней, расположенных под ними. С вынутого стержня снимают всю старую изоляцию. Медь очищают и отжигают, чтобы снять наклеп, образовавшийся при нескольких изгибах лобовой части стержня. Новая изоляция должна иметь ту же конструкцию, что и изоляция других стержней. Перед установкой переизолированного стержня в паз необходимо тщательно проверить целостность изоляции соседних стержней и пазовых коробок в пазах, из которых вынимались стержни. После установки стержня, изгиба лобовых частей и запайки контактов укладывают подбандажную изоляцию и наматывают бандаж.

Чтобы вынуть поврежденную катушку из пазов якоря, необходимо отпаять выводные концы секций всех катушек, расположенных в пазах по шагу обмотки, и вынуть их верхние стороны из пазов, освободив катушку с поврежденной изоляцией. После замены изоляции катушку вновь устанавливают в пазы, все соседние катушки возвращают на свои места, пазы заклинивают, наматывают бандажи и выводные концы секции припаивают к пластинам коллектора.

Как бы тщательно ни был проведен частичный ремонт обмоток, связанный с заменой отдельных катушек обмоток статоров, якорей или стержней роторов асинхронных

двигателей, он всегда уменьшает запас прочности всей обмотки, так как при этом обязательно происходит деформация соседних элементов обмотки (катушек или стержней).

В долго работающих электрических машинах изоляция обмоток, как правило, сухая и теряет свою первоначальную гибкость и эластичность, поэтому любое неосторожное движение во время отгиба лобовых частей, выемки сторон катушек из пазов и других операций, необходимых при замене катушки, приводит к ослаблению электрической прочности соседних элементов обмотки. В практике известно много случаев, когда после замены одной катушки обмотки во время испытаний электрической прочности изоляции пробивается корпусная изоляция соседних катушек и т. д. Поэтому частичный ремонт обмоток, особенно двухслойных, производят лишь для того, чтобы избежать необходимости немедленного вывода машины в капитальный ремонт в неудобное для производства время.

§ 78. РЕМОНТ ОБМОТОК СТАТОРОВ

При капитальном ремонте обмоток статоров прежде всего удаляют старую обмотку. Старый обмоточный провод всыпных обмоток сохранить во время выемки обмотки из пазов невозможно, так как после пропитки все проводники обмотки прочно сцементированы друг с другом, с пазовой изоляцией и со стенками пазов.

Всыпная обмотка укладывается в пазы через шлицы пазов. Если попытаться вынуть проводники старой обмотки также через шлицы пазов, то неизбежно повредятся тонкие усики зубцов, так как сцементированные лаком проводники будут отгибать их вверх.

Чтобы всыпную обмотку вынуть из пазов, ее лобовые части вначале обрезают с одной стороны статора вровень с торцевой поверхностью сердечника. В небольших машинах эту операцию делают на токарных станках, в машинах больших размеров – с помощью пневматического зубила. Более производительно использовать специальные установки, оборудованные устройством для закрепления статора и фрезой для обрезки лобовых частей обмоток. После этого статор очищают, продувают сжатым воздухом и для ослабления цементирующего действия пропиточного состава помещают в ванну с раствором кальцинированной соды, подогретым до 80–90 °С. Хорошие результаты дает также

метод «выжигания» изоляции в печи при 350—360 °С. За несколько часов при такой температуре пазовые клинья и изоляция обмотки почти полностью утрачивают механическую прочность, и обмотка легко вынимается из пазов.

Для удаления обмотки применяют электрические или ручные лебедки с крючьями (рис. 186). Лебедка *4* имеет упор *5*, который устанавливается к торцу статора и препятствует отгибу крайних листов *1* при вытягивании обмотки из пазов. Крюк *2* захватывает лобовую часть *6* одной или нескольких катушечных групп обмотки и с помощью троса *3* вытягивает обмотку. Если предварительно не уменьшить механическую прочность изоляции, то при вытягивании может произойти обрыв проводников или деформация зубцов статора.

После удаления старой обмотки статоры очищают от остатков изоляции, пыли и грязи. Для этой цели их загружают в контейнеры и опускают в моечную ванну с 1,5 — 3 %-ным раствором кальцинированной соды на 10 — 15 мин, после чего промывают проточной горячей водой.

В прочищенных и промытых статорах осматривают и проверяют крепление стали и устраняют мелкие дефекты, например, выправляют погнутые кромки пазов, удаляют оплавления листов стали, образовавшиеся в местах замыкания обмотки на корпус, и т. п. Статоры с большими повреждениями активной стали отбраковывают, так как перешихтовка стали машин небольшой мощности в условиях ремонтных цехов или предприятий экономически невыгодна. Выправленные и очищенные статоры поступают на обмоточный участок для укладки обмотки.

Технология заготовки изоляции, изолировки пазов и

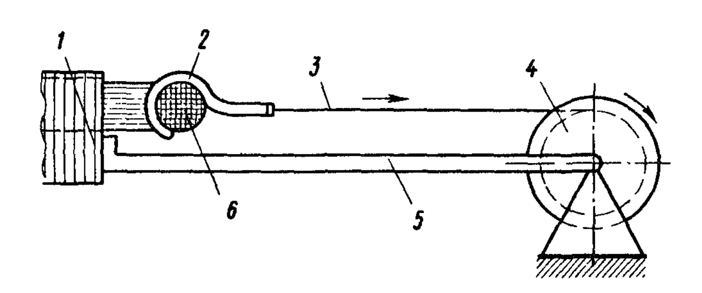


Рис. 186. Вытягивание всыпной обмотки из пазов с помощью лебедки

укладки всыпных обмоток во время капитального ремонта такая же, как при изготовлении новых машин. Отличительной особенностью этих работ является значительно меньшая, чем на электромашиностроительных заводах, механизация обмоточных работ. Это объясняется в первую очередь разнообразием типов и конструкций машин, поступающих в капитальный ремонт. Кроме того, значительная их часть — это машины старых серий, в пазы которых обмотка не может быть уложена механизированным способом. Поэтому и изолировку пазов и укладку как двухслойной, так и однослойной обмотки производят в основном вручную.

Обмотку из прямоугольного провода демонтируют также после предварительного ослабления механической прочности изоляции катушки, причем катушки вынимают из пазов поочередно в последовательности, обратной их укладке. Если несмотря на ослабление изоляции катушки с трудом выходят из пазов, их приподнимают длинными клиньями, которые забивают с торцов статора под пазовые части катушек. Сильно деформировать катушки при выемке из пазов нельзя, так как перекрученные проводники обмотки могут застрять в пазу и работа по демонтажу обмотки усложнится.

Обмотка из прямоугольного провода, состоящая из подразделенных катушек, как правило, изготовляется на ремонтном предприятии по той же технологии, что и при производстве новых машин.

В условиях ремонтного предприятия или на ремонтном участке могут быть также выполнены катушки с гильзовой изоляцией для обмоток машин на напряжение 3 и 6 кВ. Для опрессовки и запечки гильз применяют различные ручные или пневматические прессы с водяным или электрическим подогревом, конструкция которых описана в гл. VI.

Обмотки с компаундированной изоляцией в ремонтных условиях не могут быть сделаны из-за сложности компаундных установок, которые должны быть рассчитаны на различные размеры катушек. Комплекты катушек обмотки с компаундированной изоляцией обычно заказывают на предприятиях, изготовляющих данный тип машин.

Все операции по укладке обмотки, креплению ее пазовых и лобовых частей, а также пооперационные и приемо-сдаточные испытания проводятся так же и в таком же объеме, как и при производстве новых машин.

§ 79. РЕМОНТ ОБМОТОК ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При перемотке фазных роторов асинхронных двигателей в большинстве случаев сохраняют старую обмоточную медь — стержни обмотки. Перед демонтажом независимо от наличия или отсутствия документации вычерчивают схему обмотки. На поверхности ротора маркируют пазы, в которых размещаются стержни, соединенные с началами и концами фаз и с перемычками. Для этого на торцах ротора или на его наружной поверхности наносят буквы или цифры. Каждый обозначенный паз отмечают на левом и правом зубце одинаковыми знаками. Те же знаки проставляют на начерченной схеме обмотки. Разметку делают до распайки обмотки. Перед демонтажом обмотки лобовые части стержней с одной стороны ротора выпрямляют. Стержни вытаскивают из пазов с помощью ручной или электрической лебедки с упором в торцевую часть ротора.

Если демонтаж старой обмотки выполняют без предварительного ослабления пазовой изоляции, то стержни выходят из пазов туго Во время вытягивания нужно быть очень осторожным, так как при чрезмерном усилии медь стержней растягивается и стержень может даже разорваться. При этом часть стержня останется в пазу ротора. Ни в коем случае нельзя вынимать стержни, выбивая их ударами с противоположного торца. Медь при этом расклепывается и стержень может наглухо застрять в пазу и повредить его стенки.

После выемки стержни обмотки тщательно очищают от изоляции и остатков припоя и отжигают при 600 – 650 °С. Отжиг меди необходим для устранения наклепа, образовавшегося при изгибах лобовых частей и вытягивании стержней из пазов. Отожженные стержни рихтуют деревянными молотками на стальной плите. Концы их лудят в ванне с припоем ПОС-18 и передают на изолировочный участок. Пазы ротора тщательно просматривают, удаляют остатки изоляции и подготовляют к укладке обмотки. Изолировку стержней, укладку обмотки и намотку бандажей производят так же, как и в новых машинах.

§ 80. РЕМОНТ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ

Перед началом демонтажа обмотки якоря машины постоянного тока необходимо восстановить разметку якоря по старой обмотке. Обычно удается восстановить заводскую

разметку — следы кернения на торцах зубцов якоря и торцах коллекторных пластин. Если это не удалось сделать и техническая документация со схемой обмотки отсутствует, то необходимо вычертить схему. Для этого вначале определяют тип обмотки (петлевая или волновая) и шаги по пазам и по коллектору. Для стержневых обмоток такую работу сделать довольно просто, так как можно проследить положение каждой секции в пазу и последовательность соединения их выводов с коллекторными пластинами. В обмотках, секции которых состоят из нескольких витков, особенно во всыпных обмотках, для того чтобы точно определить шаги обмотки, необходимо отпаять и отсоединить от коллектора несколько выводных концов секций по предполагаемому шагу по коллектору, предварительно отметив пластины, с которыми они были соединены, и с помощью контрольной лампы найти выводы одной секции. Таким образом определяют шаг по пазам и шаг по коллектору.

При распайке соединений секции с коллектором одновременно устанавливают количество элементарных проводников, из которых состоит один эффективный проводник обмотки. В обмотках из прямоугольного провода один эффективный проводник образуется одним или двумя элементарными. Во всыпных обмотках из круглых проводников число элементарных проводников может быть больше (концы всех элементарных проводников впаиваются в петушки коллекторных пластин в один ряд один над другим).

После того как шаги определены, приступают к разметке якоря, которая проводится так же, как и в новых машинах, в зависимости от схемы обмотки и шага обмотки по пазам. Старую обмотку якоря демонтируют лишь после разметки якоря. Во время выемки обмотки из пазов полученные данные о шаге обмотки по пазам и по коллектору, числе секций в одной катушке и числе витков в одной секции уточняют. Одновременно отмечают места присоединений и количество уравнительных соединений. Все эти данные записывают и наносят на вычерченную схему обмотки.

Всыпную обмотку якоря вынимают так же, как всыпные обмотки статоров машин переменного тока, т. е. вытягивают из пазов с торца якоря, предварительно обрезав лобовые части с противоположной стороны. Катушки из прямоугольной меди и стержневую обмотку вынимают из пазов поочередно. Переизолировку или изготовление новых

катушек обмотки производят по такой же технологии, как и при производстве новых машин.

Подготовка якоря к укладке обмотки включает также полную ревизию коллектора. Проверяют плотность крепления пластин, при необходимости заменяют бандажи из шнура или стеклоленты на коллекторных конусах в местах выхода манжет из-под пластин. Проверяют состояние самих коллекторных манжет, очищают от остатков припоя петушки коллектора. Поверхность коллектора в зависимости от ее состояния протачивают или шлифуют; продороживают изоляцию между пластинами. Для измерения сопротивления изоляции коллектора и испытания ее электрической прочности коллектор обертывают несколькими витками неизолированной медной проволоки так, чтобы она плотно прилегала ко всем пластинам. Один вывод испытательной установки или мегаомметра для измерения сопротивления изоляции подключают к проволоке, другой – к валу якоря.

Укладку обмотки начинают с установки уравнительных соединений, изоляции обмоткодержателей и пазовой изоляции. Последовательность дальнейших работ по укладке и контролю обмотки такая же, как и при изготовлении новых машин.

§ 81. РЕМОНТ КАТУШЕК ВОЗБУЖДЕНИЯ

Частичный ремонт многовитковых катушек возбуждения из круглого или прямоугольного провода, как правило, не производят, так как любое повреждение обмотки – пробой витковой, корпусной изоляции или обрыв провода – в большинстве случаев приводит к повреждению изоляции нескольких соседних витков и обычно требует перемотки всей катушки. Использовать старый обмоточный провод для вторичной намотки катушки также в большинстве случаев не удается, так как в результате нескольких перегибов и натяжения во время намотки его изоляция теряет механическую прочность. Кроме того, витки катушек сцементированы пропиточным лаком, очистить от остатков которого весь провод катушки не удается.

Старую медь используют лишь при ремонте катушек возбуждения синхронных машин и полюсов машин постоянного тока, намотанных из неизолированной шинной меди. Для ремонта катушки снимают с полюсов, витки растягивают, очищают от старой витковой изоляции, состоящей большей частью из асбестовой бумаги, и устанавливают

новую изоляцию, промазывая ее клеящим лаком. Катушки опрессовывают и устанавливают на полюсы после замены на них корпусной изоляции. Полюсы изолируют по такой же технологии, как и при производстве новых машин.

Правила и нормы контроля и испытаний капитально отремонтированных катушек возбуждения не отличаются от установленных ГОСТом для новых машин.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 В чем заключается система планово-предупредительного ремонта?

2. Какие работы выполняют во время текущих ремонтов электрических машин?

3. Что входит в объем работ при среднем ремонте электрических машин?

4 Какие работы выполняют при капитальном ремонте электрических машин?

5 В каких случаях можно производить частичный ремонт обмоток?

6 Как определить место замыкания обмотки на корпус?

7 Как удаляют старую всыпную обмотку из статора во время капитального ремонта?

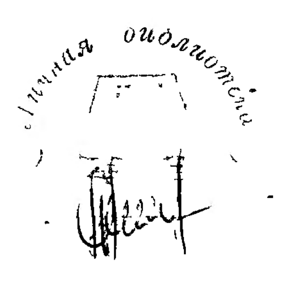
8 Как демонтируют обмотку фазных роторов асинхронных машин?

ЛИТЕРАТУРА

Кокорев А С Справочник молодого обмотчика – М Высшая школа, 1979

Перельмутер Н М Электромонтер-обмотчик и изолировщик по ремонту электрических машин – М Высшая школа, 1980

Кокорев А С Производственное обучение – М Высшая школа, 1980



ОГЛАВЛЕНИЕ

Борис Константинович Клоков

ОБМОТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Редактор Г А Сильвестрович
Художник Ю Д Федичкин
Художественный редактор Т В Панина
Технический редактор Н А Битюкова
Корректор В В Кожуткина

ИБ № 2768

Изд № ЭГ-408 Сдано в набор 24 08 81 Подп в печать 23 02 82 Т — 02269 Формат 84 × 108$^{1}/_{32}$ Бум тип № 3 Гарнитура таймс Печать высокая Объем 14,7 усл печ л Усл кр-отт 14,81 Уч-изд л 15,2
Тираж 100 000 экз Зак № 68 Цена 35 коп

Издательство «Высшая школа», Москва К-51, Неглинная ул, д 29/14

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А М Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
197136, Ленинград, П-136, Чкаловский просп, 15